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

5 2016 (190)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Сорокин М.Н. Селективная сборка: проблемы и перспективы 3

Степанова М.А., Медведев А.М. Соединения типа press-fit *(аналитический обзор)* 7

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка трубопроводных систем 12

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Плешаков А.А., Кристаль М.Г. Теоретическая оценка передаточной функции и погрешности измерения автоматического пневмоэлектронного устройства 24

Экология и безопасность сборочных работ

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка корпусных установок с амальгамными лампами типа УДВ-А для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением 28

Трение и смазка в машинах и механизмах

Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения 33

Ноженков М.В. Потоки подобных частиц без диссипации энергии 38

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

5 2016 (190)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Sorokin M.N. Selective assembly: problems and prospects 3
Stepanova M.A., Medvedev A.M. Press-fit connections *(analytical review)* 7

Assembly welding works. Soldering

Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Soldering water systems 12

Quality assurance. Testing. Monitoring

Pleshakov A.A., Kristal M.G. Analytical computation of transfer function and measurement error of the automatic pneumo-electronic gauge 24

Ecology and safety in assembly

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Boychuk M.I. Assembly plants for water disinfection by ultraviolet radiation amalgam lamps type DUV-A 28

Friction & lubrication

Shishkarev M.P., Tran Van Duc. Analysis of the accuracy of the adaptive response friction clutch of the second generation 33
Nozhenkov M.V. Flows of similarity particles without energy dissipation 38

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. KOSTIUKOV

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 621.717

М.Н. Сорокин, *д-р техн. наук*
(Московский государственный вечерний металлургический институт)
E-mail: Sorokin-mn@mail.ru

Селективная сборка: проблемы и перспективы

Рассматривается возможность применения селективной сборки на базе метода межгрупповой взаимозаменяемости при различных способах ее реализации в различных отраслях промышленности.

Possibility of application of selective assembly on the basis of a method of inter-group interchangeability is considered at various ways of its realization in various industries.

Ключевые слова: селективная сборка, задача комплектования, метод межгрупповой взаимозаменяемости, способ реализации селективной сборки.

Keywords: selective assembling, matching problem, method of inter-group interchangeability, way of realization of selective assembly.

С повышением качества, надежности и долговечности различного рода изделий повышаются требования к точности параметров сопряжений.

Точность параметров сопряжений можно повысить двумя путями.

Первый путь — за счет повышения точности технологического оборудования, на котором получаются сопрягаемые параметры деталей, образующие изделие, с последующей сборкой по методу полной взаимозаменяемости.

Если возможности технологического оборудования исчерпаны, конструкторские решения не могут обеспечить требуемой точности параметра сопряжения, то возникает необходимость использовать селективную сборку изделий. Селективная сборка определяет второй путь обеспечения повышения точности сопряжений в изделии.

Первое упоминание о селективной сборке в отечественной научной литературе относится к 1938 г. [1]. Интенсивное изучение селективной сборки в нашей стране началось с середины 60-х годов.

Селективная сборка, применяемая в настоящее время в промышленности, осуществляется по методу групповой взаимозаменяемости. Ее основной недостаток — наличие незавершенного производства. Селективная сборка успешно применяется в промышленности при сборке плунжерных пар, питателей, подшипников и подшипниковых узлов, спиральных компрессоров, электронных схем, узлов оптической аппаратуры и других изделий. Это связано с применением дополнительных технологических процессов, обеспечивающих необходимую собираемость изделий.

Основные причины, ограничивающие применение селективной сборки:

— высокоточные средства измерения сопрягаемых параметров;

— невозможность применения в мелкосерийном производстве;

— отсутствие возможности замены детали при ремонте узла;

— четкая организация технологического процесса селективной сборки.

Однако конструирование и производство ряда высокоточных узлов в настоящее время и

не предполагает замену его элементов. Узел просто меняют целиком. При применении метода межгрупповой взаимозаменяемости возможна организация селективной сборки изделий и для мелкосерийного производства. Высокоточные средства измерения сопрягаемых параметров, четкая организация технологического процесса являются не ограничениями для применения селективной сборки, а условиями ее реализации, что приводит к существенному повышению потребительских свойств изделий.

При селективной сборке изделий важными являются задачи комплектования и получения сборочных комплектов деталей. Для селективной сборки изделий типа "вал-втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости задача комплектования является тривиальной. Для селективной сборки изделий типа "подшипник" задача комплектования не была формализована и решалась методом случайного поиска, разные схемы комплектования не были эффективными.

При селективной сборке изделий типа "вал-втулка" по методу групповой взаимозаменяемости длина селективного интервала выбирается равной половине допуска параметра сопряжения, а для селективной сборки изделий типа "подшипник" — одной трети допуска параметра сопряжения.

В середине 70-х годов прошлого столетия для решения уравнения сопряжения (уравнения размерных цепей) был предложен метод межгрупповой взаимозаменяемости [2]. Идея метода заключалась в выборе селективных интервалов, длина которых была существенно меньше длины селективных интервалов для метода групповой взаимозаменяемости. Это позволило увеличить число возможных вариантов получения сборочных комплектов и при определенных условиях обеспечить полную собираемость изделий.

Главное заключалось в том, что задача комплектования при селективной сборке изделий по методу межгрупповой взаимозаменяемости была формализована. Она представлена в непрерывном виде как задача Монжа—Канторовича с индикаторной функцией стоимости. В дискретном виде задача комплектования является задачей целочисленного линейного программирования, или задачей определения максимального потока на транспортной сети комплектования [3, 6].

Принципиальное отличие метода межгрупповой взаимозаменяемости от метода групповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий заключается в следующем. Если при селективной сборке изделий по методу групповой взаимозаменяемости главное — это обеспечить минимальное значение незавершенного производства, то по методу межгрупповой взаимозаменяемости — обеспечить минимальный допуск параметра сопряжения при условии полной собираемости изделий.

Допуск параметра сопряжения при селективной сборке изделий при применении метода межгрупповой взаимозаменяемости может варьироваться от величины допуска параметра сопряжения при применении метода полной взаимозаменяемости до величины допуска, кратного величине дискретности измерения сопрягаемых параметров, если эта величина дискретности одна и та же для всех сопрягаемых параметров. При сборке высокоточных подшипников при длине селективного интервала сопрягаемых параметров, равного 1 μk, допуск радиального зазора составляет 2 μk, т.е. селективная сборка позволила увеличить точность параметра сопряжения в 30 раз по сравнению со сборкой подшипника по методу полной взаимозаменяемости.

Наибольшую эффективность селективная сборка по методу межгрупповой взаимозаменяемости имеет при минимальной длине селективного интервала, т.е. когда селективный интервал равен значению дискретности измерения сопрягаемого параметра. Это имеет место, когда селективная сборка осуществляется по действительным значениям сопрягаемых параметров.

Главной задачей при селективной сборке изделий является обеспечение минимального допуска параметра спряжения и требуемое его положение на размерной оси при обеспечении полной собираемости изделий.

При реализации селективной сборки по методу межгрупповой взаимозаменяемости существует жесткая связь между допуском па-

раметра сопряжения и его положением с допусками сопрягаемых параметров и их положением, в результате чего обеспечивается минимальное значение допуска параметра сопряжения и полная собираемость изделий. Поле допуска сопрягаемых параметров обеспечивается технологическим процессом изготовления деталей. Технологический процесс формирует функцию распределения плотности вероятностей сопрягаемого параметра на поле его допуска, которое влияет на параметр сопряжения. Если рассматривать конкретные законы распределения сопрягаемых параметров, то в результате решения задачи комплектования получим собираемость изделий в виде детерминированной величины. Однако всегда существуют вариации законов распределения сопрягаемых параметров на их поле допуска из-за нестабильности технологического процесса. На практике при выборочном значении функции распределения сопрягаемых параметров, а точнее, функции распределения деталей по селективным группам, минимальный допуск параметра сопряжения будет случайной величиной. Следовательно, допуск параметра сопряжения, полученный для конкретной функции распределения сопрягаемого параметра, должен быть увеличен.

Кроме того, уменьшение числа деталей в партии, поступившей для комплектования, также требует увеличения допуска параметра сопряжения. Поэтому селективная сборка по методу межгрупповой взаимозаменяемости может быть применена и при мелкосерийном производстве, но с увеличением допуска параметра сопряжения.

Существует еще один случайный фактор, влияющий на величину допуска параметра сопряжения и на его положение. Это погрешность измерения сопрягаемых параметров. Чтобы исключить их влияние на параметр сопряжения, нужно расширить допуск на параметр сопряжения. В этом случае селективная сборка не будет иметь бракованных сопряжений.

Для селективной сборки по методу межгрупповой взаимозаменяемости всегда есть предельное значение допуска параметра сопряжения, при котором будет обеспечиваться полная собираемость изделий при компенсации погрешностей измерений сопрягаемых параметров и нестабильности технологического процесса. Точнее сделать это сопряжение возможно лишь за счет применения селективной сборки по действительным значениям сопрягаемых параметров, уменьшения дискретности измерения сопрягаемых параметров и повышения точности и стабильности технологического процесса получения сопрягаемых параметров.

Так как селективная сборка по методу межгрупповой взаимозаменяемости обеспечивает полную собираемость изделий и технологический процесс ее реализации формализован, то для ее реализации могут быть созданы автоматические устройства.

Селективная сборка изделия относится к наукоемким технологиям. Инженеру-технологу, разрабатывающему технологический процесс селективной сборки, необходимо знать теорию вероятностей и математическую статистику, задачу Монжа—Канторовича, теорию линейного программирования, теорию транспортных сетей. Кроме того, необходимо наличие специалиста, разрабатывающего конкретный алгоритм комплектования и реализующий данный алгоритм на выбранном языке программирования.

При разработке технологии селективной сборки изделий должны быть выполнены следующие операции:

— выбор технологических процессов, обеспечивающих получение сопрягаемых параметров;

— выбор допусков сопрягаемых параметров, обеспечивающих величину и положения допуска параметра сопряжения на оси измерения;

— выбор способа реализации селективной сборки;

— выбор схемы комплектования;

— разработка алгоритма комплектования и его реализация на алгоритмическом языке.

Допуск параметра сопряжения существенно зависит от способа реализации селективной сборки.

Для селективной сборки изделий типа "вал-втулка" и типа "подшипник" должен быть выбран способ реализации селективной сборки.

При периодической селективной сборке детали для комплектования поступают партиями. Происходит измерение сопрягаемых параметров, распределение деталей по селективным группам, решение задач комплектования, образование сборочных комплектов и сборка изделий. Затем поступает новая партия деталей, к ней добавляются нескомплектованные детали предыдущей партии, происходит комплектование, сборка изделий и процесс продолжается. В этом случае задача комплектования решается методом целенаправленного суммирования или методом перераспределения направленного потока.

При непрерывной селективной сборке одна из деталей поступает случайным образом. Другие детали поступают партиями через определенное количество сборочных комплектов. В этом случае задача комплектования решается методом целенаправленного выбора.

При селективной сборке с заделом при решении задачи комплектования допускается запас какой-либо одной детали в селективных группах в количестве большем, чем нужно для комплектования при периодической селективной сборке. Если рассматривать селективную сборку плунжерных пар, то такой деталью является вал. Точность параметров сопряжения в этом случае обеспечивается интуицией и опытом комплектовщицы. Если рассматривать селективную сборку подшипников, то деталью, которая служит для накопления, являются шарики. Они самые дешевые и по ним на предприятии всегда есть задел. Для решения задач комплектования для изделий типа "подшипник" при данном способе реализации селективной сборки разработан метод двойного комплектования.

Управляемая селективная сборка имеет место, когда необходимо согласовать допуски сопрягаемых параметров. Это относится к селективной сборке изделия типа "вал-втулка". Поэтому возникает необходимость увеличения поля допуска одного из сопрягаемых параметров за счет изменения технологического процесса его получения. Примером служит плунжерная пара, когда точность получения плунжера выше, чем отверстия.

Селективная сборка изделий по методу межгрупповой взаимозаменяемости может применяться для сборки любых изделий, состоящих из деталей с несколькими сопрягаемыми параметрами и с несколькими параметрами сопряжений.

Селективная сборка должна занять достойное место при изготовлении различных высокоточных изделий. Главное ее достоинство — это возможность создать автоматические установки, где будут интегрированы операции измерения, комплектования и сборки изделий при условии полной собираемости изделий и минимальном допуске на параметр сопряжения.

Библиографический список

1. **Зыков А.А.** Основные методы селекционной сборки // Станки и инструменты. 1938. № 4. С. 13—19.
2. **Сорокин М.Н.** Алгоритмизация комплектования в системах управления технологическим процессом селективной сборки изделий: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИЭМ, 1989. 42 с.
3. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 8. С. 16—19.
4. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал-втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 9. С. 15—18.
5. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А., Урманова Д.И.** Математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 3. С. 40—43.
6. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А.** Метод перераспределения потока для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 9. С. 7—13.

УДК 621.88.084; 621.3.049.75

М.А. Степанова, А.М. Медведев, *д-р техн. наук (Московский авиационный институт — Национальный исследовательский университет)*
E-mail: marya.stepanova.argon@mail.ru

Соединения типа press-fit *(аналитический обзор)*

Рассмотрены непаяные соединения, выполняемые запрессовкой. Описаны приспособления и оборудование для выполнения данного типа соединений, а также дано поэтапное описание процесса запрессовки.

Presents solderless connections, press-in connections. The description of devices and equipment that are used during the process and also phased description of the whole process are given.

Ключевые слова: непаяные соединения, печатные платы, авионика, соединения запрессовкой.

Keywords: solderless connections, printed circuit boards, avionics, press-fit connections.

Для запрессовки контактов в печатную плату требуются приспособления, воздействующие на специально разработанные элементы контакта и обеспечивающие заданную глубину запрессовки контакта в печатную плату за счет использования ограничителя глубины. При этом необходимо исключить возможность повреждения рабочих поверхностей контакта и печатной платы приспособлением для запрессовки.

Применяются различные виды приспособлений для запрессовки контактов:

- приспособление для запрессовки одиночных контактов — чаще всего работает в автоматическом режиме с использованием автоматического позиционирующего устройства (незаменимо в случаях, когда большое число контактов должно быть установлено в произвольной конфигурации);
- комбинированное приспособление для запрессовки — используется в случаях, когда контакты в фиксированной конфигурации должны быть установлены, например, в ряд с постоянным шагом (может быть ручным или автоматическим).

Сборочное приспособление для запрессовки может воздействовать непосредственно на контакты или на другую часть предварительно собранного продукта, являющуюся достаточно прочной для передачи силы на контакты.

Приспособление для запрессовки одиночных контактов может иметь довольно простую конструкцию (рис. 1). В общих чертах оно представляет собой комплект компонентов, устанавливаемых на ручной или автоматический пресс с плавным ходом штока и силой, достаточной для запрессовки соединителей, подлежащих установке. Максимальные силы, требуемые для запрессовки соедининелей[1], следующие:

96-контактные соединители — 90 Н;
64-контактные соединители — 60 Н;
48-контактные соединители — 45 Н;
32-контактные соединители — 30 Н;
30-контактные соединители — 28 Н;
20-контактные соединители — 18 Н;
16-контактные соединители — 15 Н.

При выборе пресса для монтажа запрессовываемых контактов/соединителей не рекомендуется применять пресс, ранее выполнявший тяжелую и грубую работу, а также не рекомендуется использовать для других операций пресс, выделенный под операцию запрессовки. Пресс должен обеспечивать строго вертикальный и настраиваемый ход штока и

[1] При запрессовке розеточных соединителей EUROCARD, соответствующих стандарту DIN 41612.

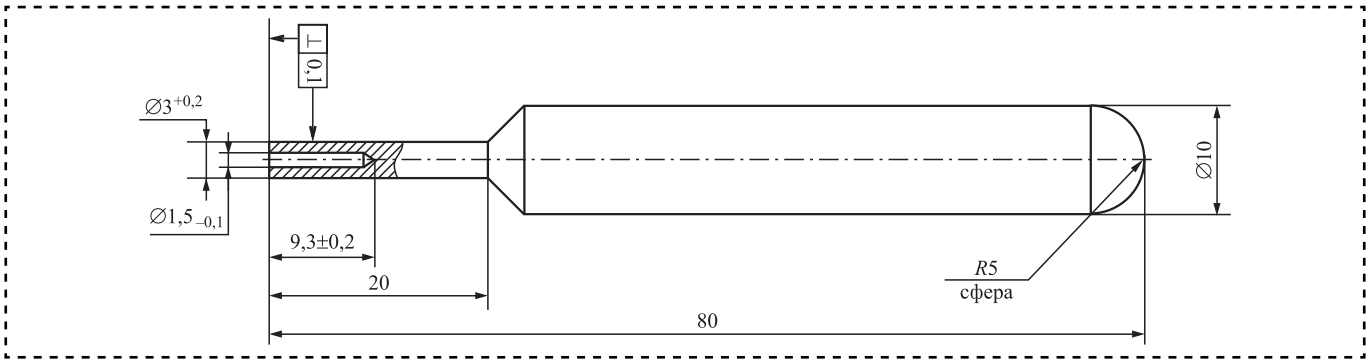


Рис. 1. Приспособление для запрессовки одиночных контактов

иметь приспособления для крепления платы, пуансона (рис. 2) и подплатной матрицы (рис. 3).

Основными компонентами комплекта для запрессовки одиночных контактов и соединителей с запрессовываемыми контактами являются пуансон и подплатная матрица, обеспечивающая дополнительную жесткость платы (рис. 4). Пуансон для запрессовки одиночных контактов (см. рис. 1) имеет цилиндрическую

Рис. 2. Пуансон

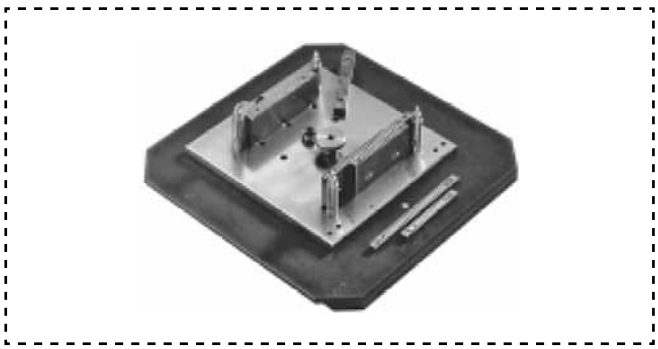


Рис. 3. Подплатная матрица

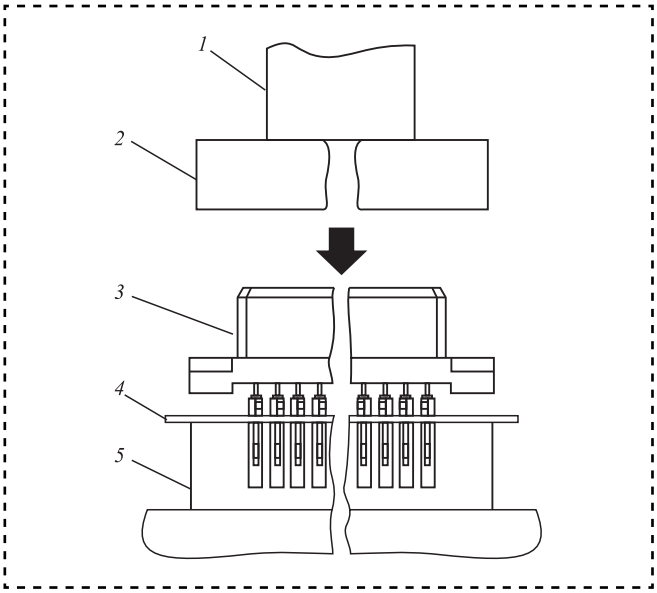


Рис. 4. Основные компоненты, принимающие участие в процессе запрессовки:
1 — шток пресса; *2* — пуансон; *3* — соединитель; *4* — печатная плата; *5* — подплатная матрица

форму, снабжен ограничителем для получения заданной глубины и обеспечивает передачу давления со штока пресса на соответствующие опорные поверхности контакта, а также вертикальность запрессовки контакта. Конструкция пуансона для запрессовки соединителей с запрессовываемыми контактами зависит от того, является ли данный соединитель розеткой или вилкой (рис. 5).

В отличие от пуансонов для запрессовки вилочных соединителей, имеющих простую конструкцию, пуансоны для запрессовки розеточных соединителей представляют собой более сложное и точное техническое изделие вследствие особенностей самих соединителей.

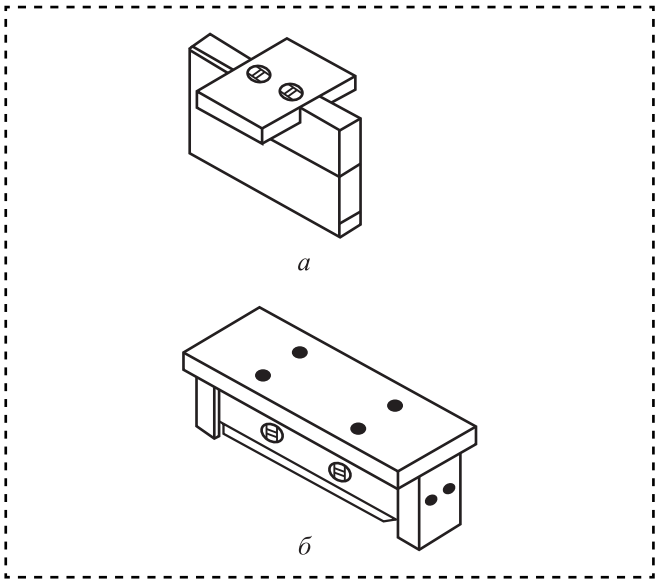


Рис. 5. Разновидности пуансонов:
а — для запрессовки вилочных соединителей; *б* — для запрессовки розеточных соединителей

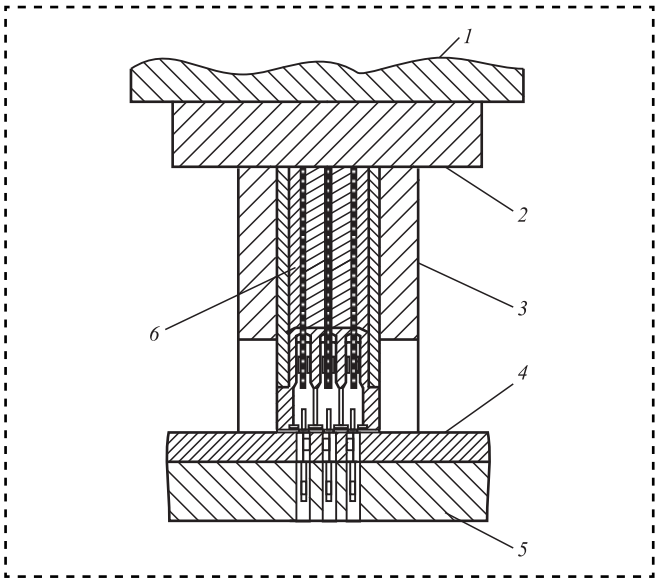


Рис. 6. Поперечное сечение пуансона для запрессовки розеточных соединителей:
1 — шток пресса; *2* — опорная поверхность пуансона; *3* — корпус пуансона; *4* — печатная плата; *5* — подплатная матрица; *6* — пластины, оказывающие давление на "дно" лирообразных окончаний контактов

В розеточных соединителях контакты немного утоплены в тело корпуса и имеют лирообразное окончание, в которое при сочленении соединителей входит штыревой контакт ответного соединителя (рис. 6). Таким образом, данный лирообразный контакт имеет лишь одну опорную поверхность для прикладывания силы запрессовки — это "дно" лиры. Сложность конструкции пуансона обусловливается еще и тем, что само лирообразное окончание контакта находится в довольно узкой прямоугольной ячейке корпуса соединителя, и малейшее отклонение конструктивных элементов пуансона в сторону может привести к повреждению как самого контакта, так и корпуса соединителя, в котором данный контакт установлен.

Подплатная матрица, поддерживающая печатную плату в местах, максимально приближенных к отверстиям, в которые запрессовываются контакты, имеет достаточно большие габаритные размеры для надежной поддержки печатной платы и предотвращения ее изгиба (рис. 7).

Некоторые виды подплатных матриц имеют длинные канавки, в которые позиционируются запрессованные контакты. Такие матрицы удобно использовать при конвейерной запрессовке. В других матрицах выполняется большое число отверстий, соответствующее отверстиям для запрессовки на плате. Такие матрицы обеспечивают максимальное качество соединений, однако не позволяют передвигать плату с одной позиции на другую и позволяют только приподнимать ее. Данные матрицы непригодны для массовой запрессовки.

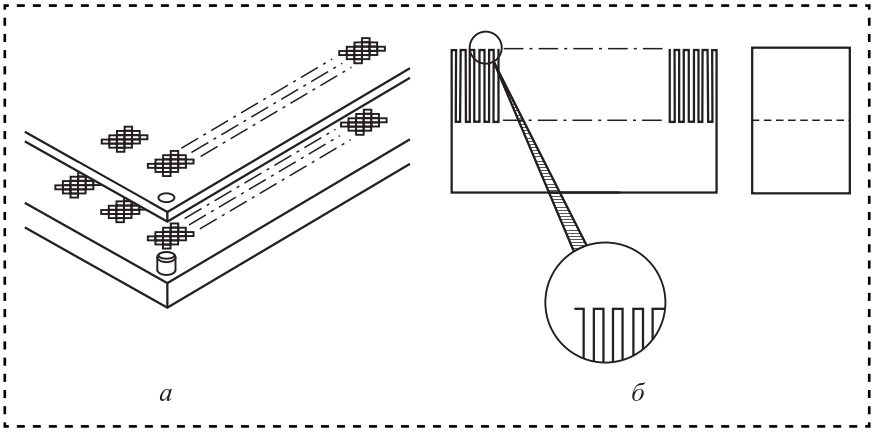


Рис. 7. Разновидности подплатных матриц:
а — с отверстиями; *б* — с канавками

Подплатные матрицы изготавливаются из металла (например, стали или алюминия) или из прочной пластмассы. В любом случае из материала, обладающего прочностью, способного выдержать силу запрессовки. Глубина канавок/отверстий в матрице должна быть больше длины той части контакта, которая выступает из платы после запрессовки. Данное обстоятельство становится особенно актуальным при запрессовке контактов, предусматривающих последующий монтаж накруткой.

Технологический процесс запрессовки

Операция запрессовки выполняется на одном рабочем месте, оборудованном прессом и соответствующими приспособлениями. Наиболее перспективной является запрессовка именно соединителей, так как применение одиночных контактов ненадежно, особенно в технике военного назначения.

Практический опыт указывает на необходимость предварительной наладки пресса (заключается в настройке длины рабочего хода штока пресса). Это позволяет избежать как недозапрессовки соединителей, что в дальнейшем нарушит сочленяемость данных соединителей с ответными частями, так и избыточной запрессовки, которая может привести к разрушению и корпуса соединителей, и структуры сквозного металлизированного отверстия. Этап наладки приобретает особенно актуальное значение при работе с соединителями разного типоразмера и платами разной толщины. Для наладки предлагается использовать технологические соединители и печатные платы, являющиеся полными аналогами тех компонентов, которые будут участвовать в дальнейшем ТП.

Последовательность действий при запрессовке соединителей (использованы материалы фирмы EPT):

1. Установить и закрепить подходящий пуансон на штоке пресса, а подходящую подплатную матрицу — на станине станка (рис. 8 на стр. 3 обложки).

2. Установить плату под запрессовку на подплатную матрицу и закрепить винтами (рис. 9 на стр. 3 обложки).

3. Установить соединители на плату до фиксации, соблюдая строгую вертикальность их ориентации (рис. 10 на стр. 3 обложки, рис. 11). Нельзя устанавливать соединители слишком глубоко, так как это может привести к негативным последствиям вследствие перекоса (рис. 12 на стр. 3 обложки).

4. Опустить шток пресса, затем поднять его. Соединитель запрессован. Повернуть подплатную матрицу и так же запрессовать остальные соединители (рис. 13 на стр. 3 обложки).

5. Снять плату с установленными соединителями и положить корпусами соединителей вниз (рис. 14 на стр. 3 обложки).

Операция запрессовки обычно проводится до установки остальных компонентов на плату.

Зарубежные фирмы-производители рекомендуют выполнять запрессовку соединителей на платы с уже установленными компонентами. Однако практика показывает, что такой подход

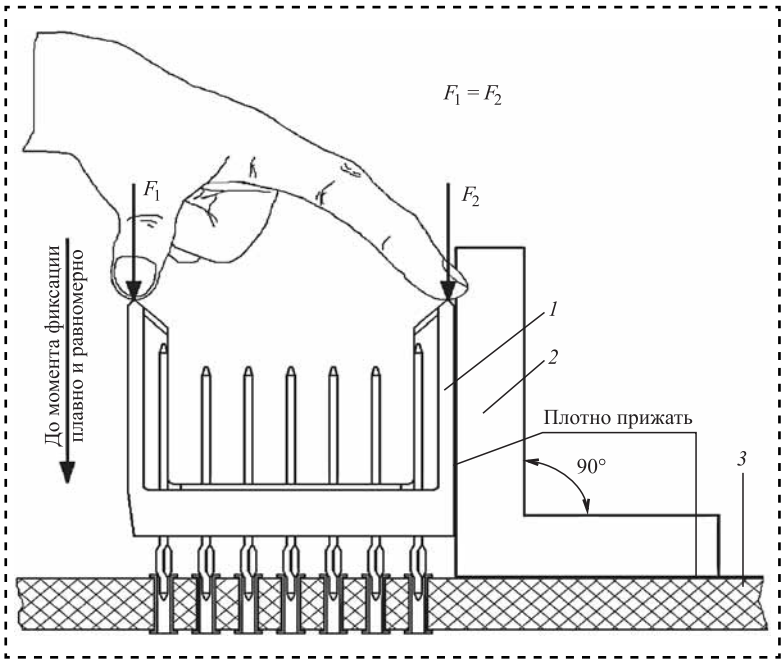


Рис. 11. Установка соединителя Z-PACK шины CompactPCI на печатную плату:
1 — технологический соединитель; *2* — угольник; *3* — технологическая печатная плата

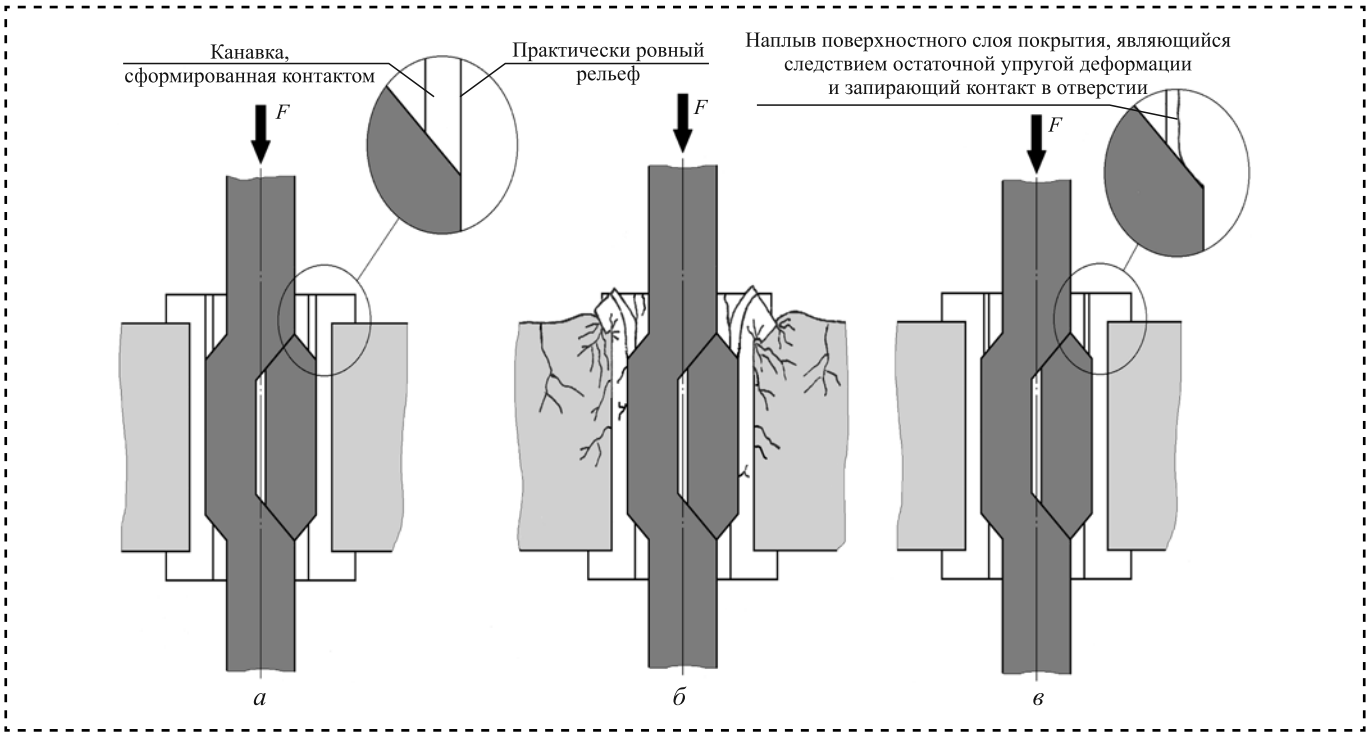


Рис. 15. Предполагаемое влияние скорости запрессовки на качество получаемых соединений (на примере контакта фирмы AMP):
а — оптимальная скорость запрессовки; *б* — высокая скорость запрессовки; *в* — низкая скорость запрессовки

не всегда приемлем. При высоком уровне "заселенности" платы может оказаться недостаточно пространства для размещения подплатной матрицы (особенно, если соседние компоненты имеют длинные выводы).

Еще одной проблемой при запрессовке является скорость подачи штока пресса (рис. 15). При слишком высокой скорости подачи штока пресса вывод соединителя будет слишком резко входить в сквозное металлизированное отверстие и это может привести к возникновению трещин в отверстиях и в самой плате. Слишком медленная подача штока может не обеспечить достаточной прочности удержания вывода в отверстии. Эти выводы являются теоретическими и требуют экспериментального подтверждения. Необходимо разработать методики определения и практической оценки оптимальной скорости запрессовки.

Библиографический список

1. **Corman N., Myers M., Copper Ch.** Friction Behavior of Press-Fit Applications: test apparatus and methodology // Proceedings of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2003.

2. **Sontheimer P.** Vice President, R&D and Product Mariteting, Vincotech GmbH. Press-Fit Pin Enables Solder-Less Assembly // Power electronics technology. 2011.

3. **Technical** Notes// ept Guglhör Peiting GmbH & Co.KG. Electronic Precision Technology. URL: http:www.ept.de

4. IEC 60352-5, Solderless Connections. Part 5: Press-in connections General requirements, test methods and practical guidance, Edition 3.0. 2008.

5. **Медведев А.М.** Сборка и монтаж электронных узлов. М.: Техносфера, 2007. 257 с.

6. **Дятлов К., Медведев А., Плотников Ф.** Технология запрессовки контактов в металлизированные отверстия плат (press-fit technology). URL: http: www.elcp.ru.

7. **Плотников Ф.Г.** Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой — новый класс соединений на российском рынке электронной техники // Компоненты и технологии. 2001. № 1.

8. **Медведев А.** Соединения типа press-fit // Компоненты и технологии. 2006. № 8.

9. **Степанова М.А.** Соединения типа press-fit (аналитический обзор) // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 8 (181).

УДК 621.791.048

И.О. Бохоров, В.В. Карабанов, *канд. техн. наук, 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 и промышленные трубопроводы, композиционный припой, флюс, аргон, рифление, магнитная пайка, сварко-пайка, газопроводы, эмалевое покрытие.

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

Трубопроводные системы являются важнейшими элементами современной техники (технические трубопроводы), а также широко используются в промышленности в качестве трубопроводного транспорта для жидких и газообразных продуктов (промышленные трубопроводы).

Технические трубопроводы изготавливаются в заводских условиях из тонкостенных труб малых диаметров. Промышленные трубопроводы — из относительно толстостенных стальных труб больших диаметров, в том числе в полевых условиях.

От качества изготовления технических трубопроводов зависит надежная, безаварийная работа двигателей, машин, различных аппаратов и установок, поэтому к качеству соединений трубопроводных систем предъявляются высокие требования. Трубопроводные системы работают в сложных и разнообразных условиях: при коррозионном воздействии жидкостей и газов, при низких и высоких температурах, испытывают частую смену нагрева и охлаждения, статические и переменные нагрузки. В современной технике, особенно, в области авиации и космонавтики применяются трубопроводные системы различного назначения: топливные, масляные, воздушные, кислородные, кислотные и др.

Технические трубопроводные системы состоят из труб и соединительных деталей двух типов — концевых и промежуточных, объединяемых с помощью неразъемных соединений — сварных или паяных. При их изготовлении применяют трубы, изготовленные из сталей и цветных металлов (меди, латуни, алюминиевых сплавов, титана). Выбор материала для трубопровода зависит от его назначения, условий эксплуатации и технологичности конструкции трубопровода [1].

Для работы в условиях высоких давлений, агрессивных сред, переменных температур и вибрационных нагрузок применяют трубы, изготовленные из коррозионно-стойких сталей, например, марок 12Х18Н10Т и 12Х21Н5Т. Трубы выпускаются диаметрами 2...42 мм с толщиной стенки 0,5...1,5 мм.

Цельнотянутые трубы из латуни применяют преимущественно для топливных линий.

Наиболее важными и ответственными элементами трубопроводных систем являются участки соединения труб друг с другом и с арматурой (соединительными деталями). Конструкции этих соединений должны обеспе-

чивать возможность применения высокопроизводительных технологических процессов их сборки и последующего соединения.

Длительное время основными способами соединения трубопроводов являлись аргонодуговая, атомно-водородная сварка и пайка. Практика эксплуатации авиационных двигателей показала, что в условиях вибрационных нагрузок паяные соединения являются более стойкими по сравнению со сварными [1]. Обычно разрушения происходят в местах соединения арматуры (соединительной детали), т.е. в местах изменения жесткости трубопровода и концентрации напряжения. Разрушения труб, соединенных с помощью сварки, вызваны наличием дефектов в виде подрезов и трещин.

Наиболее технологичными соединениями труб способом пайки являются телескопические. Они позволяют получать равнопрочную конструкцию с равномерным изменением жесткости и распределением напряжений. Допустимые колебания величины зазора в стыке — 0,05...0,3 мм.

Для качественной пайки трубопроводных систем разработаны технологии и паяльные материалы.

При пайке стальных трубопроводов в качестве припоя применяют медь и латунь. Медь из-за ее высокой температуры плавления и невысоких механических свойств используют редко. Область применения латуни ограничивается соединениями неответственных трубопроводов при пайке труб из низкоуглеродистых сталей (сталь марки 20 и т.п.). Латуни образуют достаточно прочные соединения при пайке коррозионно-стойких сталей, но охрупчивают их из-за проникновения меди по границам зерен в процессе нагрева. Этот процесс особенно нежелателен при пайке тонкостенных трубопроводов в защитной среде аргона. Латунь имеет сравнительно низкую прочность, хрупкость при повышенных температурах (200...400 °С), а также, вследствие испарения цинка при температурах выше 904 °С, может изменять химический состав в процессе пайки. Более качественным заменителем латуни Л62 является припой марки ЛОК 62-04-06, созданный на ее основе. Он отличается от латуни Л62 наличием кремния (0,4 %) и олова (0,6 %). Кремний, являясь сильным восстановителем, энергично окисляется с образованием кремнезема. Он, в свою очередь, соединяясь с химическими элементами, содержащимися во флюсе, образует боросиликаты, которые, всплывая на поверхность, препятствуют испарению и окислению цинка. Олово снижает температуру плавления и увеличивает жидкотекучесть припоя.

В настоящее время при пайке трубопроводных систем из коррозионно-стойких сталей применяют специальные припои марок ВПр1, ВПр4, припои на медной основе марок ПМЦ10, ПМЦ17, припой на никелевой основе марки 5А (для капиллярной пайки) и композиционные припои на его основе — 5АН и 6МА [2, 3].

Припой марки ВПр1 на медной основе (температура плавления — 1080...1120 °С, температура пайки 1150...1200 °С) применяется при пайке трубопроводов из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, работающей в агрессивных средах. Механические свойства припоя близки к механическим свойствам указанной стали. При пайке этим припоем используют флюсы марок ПВ200 и ПВ201. При пайке в среде аргона или газовых смесях флюсы не применяют.

Аналогичными свойствами обладает и самофлюсующий припой ВПр4 (температура плавления 940...980 °С, температура пайки 1000...1050 °С), который при быстром, например, индукционном нагреве применяют без использования флюса. Припой содержит небольшое количество щелочных металлов (K, Na, Li), выполняющих функции флюса. Они удаляют оксиды с поверхности паяемых деталей и предотвращают окисление припоя и паяемого металла в процессе пайки. Эти элементы, находящиеся в припое в виде оксидов, при его плавлении поднимаются на поверхность, где, взаимодействуя с находящимися на ее поверхности оксидами, образуют легкоплавкие соединения, имеющие температуру плавления ниже температуры пайки. Такие химические реакции протекают при обязательном присутствии бора, кремния, с образованием боросиликатов. Наличие в припое никеля, кобальта, железа, кремния обеспечивает высокую прочность соединений при температурах до 600 °С.

Припои марки ВПр1 и ВПр4 не обладают способностью к избирательному проникновению по границам зерен коррозионно-стойких сталей, поэтому широко применяются при пайке тонкостенных трубопроводов.

Припои марки ПМЦ10 и ПМЦ17 содержат кремний, который способствует растеканию припоя по коррозионно-стойкой стали. Пайку ведут в среде аргона. Паяные соединения имеют плотные швы с плавными вогнутыми галтелями. Заметного растворения паяемого металла этим припоем в процессе пайки не происходит. Прочность таких соединений на срез составляет: при 20 °С — 400 МПа, при 600 °С — 150 МПа.

Наиболее технологичный способ применения данных припоев при пайке соединений трубопроводов — закладка заготовки припоя толщиной 0,1 мм непосредственно в паяльный зазор.

Припой на никелевой основе марки 5А применяют при капиллярной пайке соединений из коррозионно-стойких сталей 12Х21Н5Т и 12Х18Н10Т (табл. 1) в порошковом виде. Содержание в припое железа повышает пластические свойства паяных соединений, а содержание бора придает ему самофлюсующие свойства. Отличительной особенностью припоя является возможность получения соединений, имеющих неравномерные зазоры, обладающих достаточной плотностью.

Для пайки соединений с широким сборочными зазорами припои, применяемые для капиллярной пайки, в основном, не пригодны. Для пайки трубопроводов с широкими зазорами между паяемыми поверхностями требуются специальные припои, которые удерживались бы в таком зазоре на протяжении всего цикла пайки. Такими свойствами обладают композиционные припои, представляющие собой механическую смесь легкоплавкой составляющей и тугоплавкого наполнителя (вольфрам, молибден, хром, никель). При нагреве до температуры пайки легкоплавкая составляющая припоя полностью расплавляется. При этом нерасплавленный наполнитель, равномерно располагаясь по объему паяного зазора, образует систему разветвленных капиллярных каналов. Они заполняются жидкой фазой легкоплавкой составляющей. В процессе выдержки при температуре пайки наполнитель растворяется в жидкой фазе, изменяя ее физико-химические свойства, повышая температуру плавления и вязкость расплава. Это способствует удержанию припоя в широком зазоре. Полнота растворения тугоплавкого наполнителя зависит от времени выдержки и температуры пайки.

Для удержания припоя в широком неравномерном зазоре при пайке телескопических соединений трубопроводов из указанных сталей созданы композиционные припои марок 5АН и 6МА (табл. 1 и 2). Первый припой представляет собой порошковую смесь припоя марки 5А и 10 % сплава 12Х18Н15. Припой обеспечивает получение коррозионно-стойких прочных (280...300 МПа) и жаропрочных соединений (200 МПа при 800 °С). Композиционный припой марки 5АН хорошо заполняет не только широкие зазоры, но и капиллярные.

Применение композиционного припоя марки 6МА при пайке указанных выше сталей обеспечивает работоспособность паяных соединений трубопроводов, эксплуатируемых при температурах, соизмеримых с температурой начала плавления паяных швов. Припой

Таблица 1

Химический состав порошкового припоя и механических смесей припоев, применяемых для пайки коррозионно-стойких сталей

Марка припоя	Массовая доля элементов, %					Массовая доля смеси, %		
	Ni	Cr	Si	Fe	B	Припой 5А	12Х18Н15	Mo
Порошковый припой 5А (ПХ12Н75С8Р)	Основа	10,0...12,0	7,8...9,0	9,0...6,0	0,35	—	—	—
Композиционный припой 5АН (ПХ13Н70С8Р)	—	—	—	—	—	90	10	—
Композиционный припой 6МА (ПХ10Н64М15С7Р)	—	—	—	—	—	85	—	15

Таблица 2

Химический состав композиционных припоев, применяемых для пайки коррозионно-стойких сталей

Марка припоя	Массовая доля элементов, %						Температура плавления, °С	Назначение припоя
	Ni	Cr	Si	Fe	Mo	B		
5АН (ПХ13Н70С8Р)	Основа	10,5...12,5	5,0...8,0	10,5...12,5	—	0,3...1,5	1180...1200	Пайка коррозионно-стойких сталей
6МА (ПХ10Н64М15С7Р)	Основа	8,5...10,2	6,5...7,7	3,5...5,0	14,0...16,0	0,2...0,4	1120...1200	Пайка коррозионно-стойких сталей, работающих при высоких температурах нагрева

представляет собой порошковую смесь припоя марки 5А и 10 % молибдена в качестве наполнителя.

Соединения труб из стали марки 12Х18Н10Т, паяные с применением припоя 6МА в среде аргона (температура пайки 1180...1200 °С), обладают прочностью 320...340 МПа и повышенной температурой при их распайке. Припой обеспечивает качественную пайку при капиллярных и широких зазорах.

Основным недостатком большинства композиционных припоев является повышенная температура плавления, которая при пайке приводит к заметному росту зерна в нагреваемой стали, что особенно затрудняет пайку толстостенных трубопроводов. Например, при пайке припоем марки 5АН, имеющем температуру плавления 1210 °С, рост зерна достигает 5...6 баллов. Этого недостатка лишен новый композиционный припой марки 65Х18Н15, состоящий из порошкообразной легкоплавкой системы Ni—Mn—Fe—Si и наполнителя — порошкового сплава Х18Н15 [4]. Имея температуру плавления 1080 °С, припой не уступает по своим технологическим характеристикам припою марки 5АН. Наличие в составе кремния обеспечивает хорошее растекание по поверхности стали. Припой изготавливают в виде порошка с размером частиц 100 мкм и применяют в виде прессованных колец.

При пайке телескопических соединений труб сечением 10×1 мм из стали марки 12Х18Н10Т с ниппелями в среде аргона получены бездефектные швы с плотными галтелями вогнутой формы. Перегрев стали трубопровода отсутствует, а размер зерна составляет 9...10 баллов. При испытаниях на статическое растяжение паяных стыков разрушение происходит вне области соединения.

Применение композиционного припоя 65Х18Н15 позволяет паять соединения при температуре более чем на 100 °С ниже, чем при пайке припоем 5АН, а отсутствие сильного роста зерна в паяемой стали позволяет повысить характеристики соединяемых трубопроводов. Разработка новых припоев и других паяльных материалов является важным направлением процесса совершенствования технологий, обеспечивающих непрерывность прогресса в разных отраслях промышленности.

При пайке трубопроводов из коррозионно-стойких сталей применяют стандартные флюсы марок ПВ201, ПВ209, содержащие фтористые соли. Бура и борная кислота, содержащие боридные соединения, непригодны для пайки коррозионно-стойких сталей. При нагреве бура и борная кислота образуют борный ангидрит B_2O_3, плохо растворяющий оксиды кремния, хрома, алюминия. Поэтому применяют флюсы с добавками тетраборатов, фторидов и содержащие фтористые соли. Пайку ведут с использованием вытяжной вентиляции. Трубопроводы из жаропрочных и коррозионно-стойких сталей паяют также в среде защитных газов (аргоне).

Пайку трубопроводов из цветных металлов осуществляют припоями, предназначенными для пайки соответствующего металла с учетом условий проведения процесса [5].

При выборе припоя учитывают материал паяемых труб, назначение и условия эксплуатации трубопровода. Каждый припой имеет свои оптимальные условия применения. Правильно выбранный припой во многих случаях

определяет качество паяного соединения и его эксплуатационные возможности.

Технические трубопроводы в машиностроении отличаются небольшими размерами сечений, но высокими требованиями по механическим и коррозионным свойствам. Небольшие размеры сечений трубопроводов обеспечивают широкие возможности по их конструктивному исполнению и по способу изготовления.

При соединении труб с помощью пайки применяют в основном телескопическую конструкцию соединения (рис. 1, *а*, *б*), получаемую раздачей конца одной из соединяемых труб. Такой же тип конструкции применяют при соединении труб с соединительными деталями. Телескопический тип соединения удобен при сборке труб и предпочтителен при всех видах нагружения паяного трубопровода, в том числе при вибрационных нагрузках, а также позволяет выполнять сборку несоосных трубопроводов. Требуемую прочность такого соединения легко обеспечить, изменяя ширину нахлестки.

Соединительные детали трубопровода (ниппели, штуцера, муфты) изготавливают, как правило, точением, реже формообразованием. Толщину стенки точенного ниппеля и штуцера в месте пайки, как правило, принимают равной 1,5 толщины присоединяемой трубы. Размеры деталей трубы должны обеспечивать легкую сборку с необходимыми под пайку зазорами. Ширину нахлестки определяют с учетом прочности применяемого припоя и необходимости обеспечить соосность трубы и соединяемой детали, и в обычных условиях принимают равной пятикратной толщине стенки трубы.

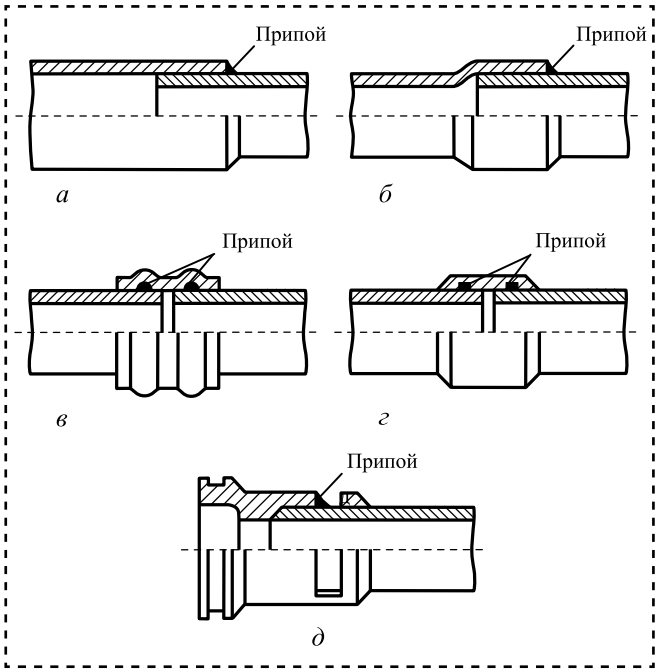


Рис. 1. Схема конструкций паяных соединений при монтаже технических трубопроводов:

а — вибропрочное соединение; *б* — соединение с формообразованной муфтой; *в* — соединение со штампованной муфтой; *г* — соединение с точеной муфтой; *д* — специальное вибропрочное соединение

Для соединения труб пайкой часто используют соединительные муфты с двумя внутренними канавками, изготавливаемые методом формообразования из трубной заготовки (рис. 1, *в*). Трубы обычно собирают с зазором между торцами, равным толщине стенки трубы. Зазор между муфтой и трубопроводом составляет 1 мм и более в зависимости от применяемого припоя. Для соединения труб, работающих в особо тяжелых условиях, применяют точеную муфту (рис. 1, *г*). После внесения в сборочный зазор припоя (толщина обычно около 0,1 мм) муфту рекомендуется обжимать.

Качество паяных соединений в значительной степени зависит от величины паяльного зазора и его равномерности. Несоосность при сборке приводит к образованию односторонних зазоров (до 0,3 мм), что способствует, а в определенных случаях является основной причиной образования дефектов в виде непропаев, пор, отсутствия в соединении галтелей. Пайка труб малых сечений (4×1 мм) припоями с высокой температурой плавления, например, марок 5АН, 6МА (температура пайки 1200 °С), может привести к пережогу металла труб, что снижает механические свойства паяных соединений. В таких случаях устанавливают минимальные зазоры и применяют припои с более низкой температурой плавления, например, марки ПМЦ10.

На практике гарантированные зазоры при пайке арматуры с трубой больших диаметров получают в основном калибровкой труб. На трубопроводах малых диаметров (4×1 мм) гарантированные зазоры обеспечивают путем раздачи труб — формообразованием на установке с использованием специальной оснаст-

ки (а.с. № 363541). Она состоит из разъемной матрицы и набора пуансонов различных диаметров, служащих для раздачи концов труб. Для уменьшения трения и исключения образования задиров при формообразовании наружную и внутреннюю поверхности концов труб смазывают индустриальным маслом.

Для соединения вибронагруженных стальных тонкостенных трубопроводов разработана конструкция вибропрочного паяного соединения. Оно изготавливается в виде наконечника с проходным отверстием и с поперечным пазом (а.с. № 759791) (см. рис. 1, *д*). В данной конструкции паяют только несущие части соединяемых элементов. Коническая часть наконечника детали выполнена с целью повышения устойчивости трубопровода вблизи паяного соединения. Наконечник предохраняет паяный шов от разрушения при вибрации и защищает паяемый стык трубопровода от механического воздействия в процессе его монтажа.

Такую конструкцию соединения рекомендуется применять для вибронапряженных стальных трубопроводов диаметрами 2...6 мм с толщиной стенки до 1 мм, которые могут подвергаться изгибу в процессе монтажа.

При монтаже трубопроводных систем возникает необходимость соединения труб из разнородных металлов, имеющих различные коэффициенты температурного расширения (КТР), например, соединений труб из меди и алюминия или его сплавов. В этом случае используют эффект повышения прочности телескопического соединения, связанный с возникновением контактного давления на соединяемых поверхностях при изготовлении охватывающего элемента соединения из трубы, материал которой имеет более высокий КТР (алюминий) [6].

Это давление увеличивает трение на границе барьерное покрытие—алюминий, затрудняя тем самым сдвиг в направлении разрушающих сил. Величина контактного давления, а следовательно, и степень упрочнения паяного телескопического соединения определяется величиной радиальных напряжений, действующих в области паяного шва.

С увеличением длины нахлестки паяного соединения собственные термические напряжения распределяются более равномерно, повышая прочность соединения на срез. Использование эффекта упрочнения соединения при пайке разнородных по материалу труб упрощает решение задачи по достижению равнопрочности и препятствует возникновению и развитию микродефектов в кристаллизационной зоне соединений при теплосменах.

Возможно получение качественных комбинированных телескопических соединений трубопроводов из меди и алюминия после их химического никелирования в местах пайки в растворе хлористого никеля. Наибольшей прочностью обладают комбинированные соединения, охватывающая деталь которых выполнена из алюминия и его сплавов. Такие соединения обеспечивают высокую надежность работы трубопроводов в условиях циклического изменения температуры.

При трудных условиях сборки и невозможности контроля ее качества в стыках трубопровода возможно образование неравномерного зазора, в котором могут образоваться непропаи и поры, снижающие качество паяных соединений. Для предупреждения появления этих дефектов рекомендуется проводить рифление паяемой поверхности охватываемой трубы, которое можно совмещать с калибровкой законцовки трубы [7, 8].

Рифление паяемой поверхности трубы проводится в специальной фильере, образующей на законцовке трубы продольные канавки, которые после сборки телескопического соединения превращаются в капилляры. Размеры канавок зависят от размера паяемых труб. Для труб малых диаметров рекомендуется наносить канавки с шагом 0,5...0,8 мм и глубиной 0,1...0,2 мм. Длина капилляра должна быть такой, чтобы образовавшаяся после пайки галтель полностью перекрывала капилляры и тем самым устранялось влияние уменьшения толщины стенки трубопровода в процессе накатки и исключалась возможность образования концентраторов напряжений.

Продольные капилляры способствуют заполнению зазора припоем и препятствуют образованию замкнутых непропаев. Накатка устраняет неравномерность зазора и способствует образованию плотных швов.

Традиционно соединение особотонкостенных трубопроводов проводили с применением трубопроводной арматуры (тройников, крестовин и т.п.), процесс производства которой достаточно трудоемок. Разработан более эффективный способ соединения таких трубопроводов без использования специально изготавливаемой соединительной арматуры, основанный на применении высокотемпературной пайки [9].

На трубе (рис. 2) с помощью специальной установки формируют "воротник" шириной 3 мм. На пристыковываемой трубе проводят калибровку посадочного места под "воротник" посредством специальной обжимки. Отверстие под тройниковое соединение получают сверлением. Для снижения вероятности образования трещин в паяном соединении, связанных с возникновением растягивающих напряжений, трубные заготовки перед пайкой отжигают.

Паяют припоем ПМЦ10 в среде проточного аргона с использованием навесных разъемных нагревателей, которые обеспечивают сравнительно равномерный и быстрый нагрев стыка.

Соединения из стали 12Х18Н10Т, паяные этим припоем (температура пайки 1040...1060 °С), имеют предел прочности на срез 429 МПа, а при 650 °С — 180 МПа.

С целью сборки трубопроводов с компенсацией как линейных, так и угловых погрешностей разработана специальная конструкция сферически-телескопического паяного соединения трубопроводов (а.с. № 685875). При ее использовании несоосность соединяемых труб может достигать десяти градусов. Конструкция соединения состоит из телескопического, сферического и переходного колец, выполненных методом точения из того же материала, что и соединяемые трубопроводы (рис. 3).

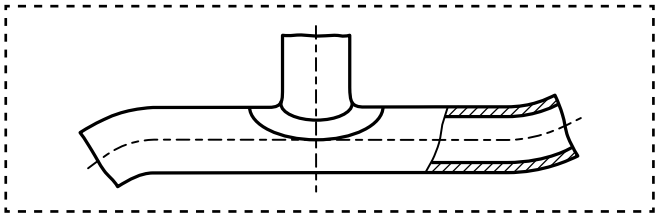


Рис. 2. Эскиз конструкции соединения трубопровода без применения трубопроводной арматуры

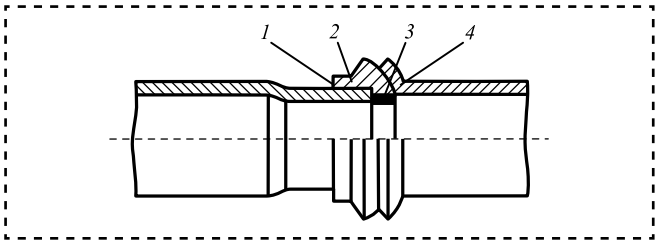


Рис. 3. Схема конструкции сферически-телескопического соединения трубопроводов под пайку:
1 — телескопическое соединение; *2* — переходное кольцо; *3* — припой; *4* — сферическое соединение

Телескопический и сферический элементы соединения изготавливали на трубах холодной штамповкой на специальной установке формообразования [10]. Телескопический элемент выполняют в разъемной матрице раздачей конца трубы пуансоном с последующей осадкой, а сферическую законцовку соединения — из трубы за три операции: утолщение стенки законцовки на 20 %, утолщение конца заготовки на 50 %, формообразование сферы. Конец трубопровода под телескопическое соединение калибруют под внутренний диаметр переходного кольца методом обжима в разъемной матрице.

Пайку сферически-телескопических соединений выполняли применительно к трубопроводам из стали 12Х18Н10Т сечением 16×1 мм припоем марки ПМЦ10 в навесном разъемном нагревателе (рис. 4). Соединение допускает многократную перепайку.

Для облегчения пайки припоями на медной основе труб из труднопаяемых материалов (например, сталь марки 12Х21Н5Т) на поверхности соединяемых элементов наносят технологическое покрытие, улучшающее затекание

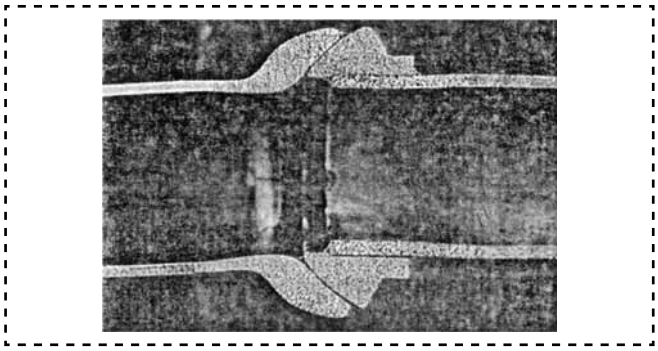


Рис. 4. Макроструктура паяного припоем марки ПМЦ10 в среде аргона сферически-телескопического соединения трубопроводов размером 16 × 1 мм из стали 12Х18Н10Т

припоя в паяльный зазор. Для пайки коррозионно-стойких сталей таким покрытием является никелевое. Оно наносится химическим или гальваническим способом оптимальной толщиной 9...12 мкм. Допустимый интервал времени между нанесением покрытия и пайкой 30 суток. В процессе пайки никелевое покрытие растворяется припоем.

Припои применяются в виде литых прутков, проволоки, листа, фольги (латунь, припои марок ВПр1, ВПр4) или в форме прессованных колец (припои марок 5АН, 6МА).

Трубопроводные системы паяют с применением газопламенного, индукционного или радиационного нагрева в соответствующих навесных нагревательных устройствах радиационного нагрева в среде аргона. Нагревательные устройства состоят из разъемного корпуса, нагревательных (ниобиевых) элементов и водоохлаждаемых кабелей. Выбранный режим пайки при необходимости уточняется на технологических образцах, а при пайке товарных соединений обеспечивается системой автоматического регулирования и его регистрацией.

Внутреннюю часть нагревательного устройства, паяемый стык трубопровода и нагревательные элементы защищают в процессе пайки от воздействия окружающего воздуха аргоном, подаваемым в рабочую полость нагревательного устройства. Продувка полости устройства начинается за одну минуту до включения нагревателя и заканчивается при остывании паяного соединения до 150...200 °С. Широко применяют ниобиевые нагреватели для пайки трубопроводов диаметрами до 42 мм с толщиной стенки до 1,5 мм, время нагрева в которых до 1250 °С составляет 2...4 мин. В таких устройствах можно паять тройниковые и безарматурные соединения трубопроводов.

При газопламенном нагреве используют нормальное ацетиленокислородное пламя (допускается небольшой избыток ацетилена или кислорода). Перед расплавлением припоя прилегающие к месту соединения участки хорошо прогревают. Степень нагрева деталей оценивается по расплавлению флюса, свечению металла, а также по характеру расплавления прутка припоя при соприкосновении с нагретыми деталями или предварительно расположенного у зазора. По мощности горелку для пайки выбирают на один номер меньше, чем для сварки стали. Трубы с толщиной стенки 1...2 мм паяют с помощью обычных инжекторных сварочных горелок с номерами наконечников — № 0, 1 и 2. Паяные соединения должны быть с плавным переходом шва к поверхности трубы и не должны иметь избытка припоя в галтели, приводящего к образованию усадочной рыхлоты. Галтели должны иметь вогнутую форму.

При пайке газовой горелкой тонкостенных трубопроводов качество пайки во многом зависит от квалификации и навыков паяльщика. При его недостаточном опыте возможен пережог стенки трубопровода, что приводит к резкому снижению качества паяного соединения.

Ручная пайка с использованием горелки отличается относительной простотой исполнения. Трубопроводы из меди, латуни и мельхиора паяют в ацетиленокислородном пламени, трубопроводы из алюминиевых сплавов — в более мягком пропано- или бутановоздушном. Пайка в таком пламени не вызывает больших затруднений. Длина нахлестки в телескопических соединениях не должна превышать 2...3 толщин стенки трубы, что связано с ухудшением проникновения припоя в сборочный зазор, вызванного активным растворением паяемого металла, происходящего из-за его близости по химическому составу к припою.

Остатки флюса с поверхности труб удаляют кипячением в течение 3...5 ч в 8%-ном водном растворе кальцинированной соды или в хромпиковом водном растворе (0,3...0,5 г/л), а также путем погружения на 40...60 минут в 7...12%-ный раствор сернокислого калия. Возможно также применение других растворов [1].

При сборке соединений труб под капиллярную пайку кольцо припоя располагают у наружной кромки стыка. При толщине труб 1...2 мм толщина кольца не должна превышать 1...2 толщины стенки трубы.

При пайке труб большого диаметра нагретый конец прутка припоя периодически погружают в порошкообразный флюс. Пайку ведут окислительным пламенем, обеспечивающим сокращение времени нагрева и более высокую прочность и пластичность паяного соединения. Детали нагревают наружным факелом пламени, сохраняя расстояние от его ядра до поверх-

ности детали 10 мм. Флюс периодически в процессе нагрева добавляют на место соединения. Для равномерного прогрева деталей горелке придают колебательные движения. Припой подводят к месту пайки после расплавления флюса. При этом горелку отводят от поверхности металла на 30...40 мм для предотвращения перегрева припоя. После пайки трубопровод должен оставаться в фиксированном положении до полного затвердевания припоя. После того, как паяный узел остынет до температуры 300 °С, его погружают в холодную воду для удаления застывшей корки флюса. Остатки флюса и шлаков удаляют механическим путем.

Трубопроводы из меди, латуни и мельхиора паяют ацетиленокислородным пламенем, алюминиевые трубопроводы — пропано- или бутановоздушным пламенем. Техника пайки трубопроводов из цветных металлов не имеет существенных отличий от применяемой при пайке стальных трубопроводов. При пайке алюминиевых труб не допускается нагревать их выше температуры растекания припоя, так как возможно разрушение трубы или присоединяемой детали. Когда деталь достаточно нагрета, при проведении по ее поверхности куском сухого дерева на ней остается черный след.

При необходимости одновременной пайки большого числа одинаковых компактных соединений труб пайку осуществляют в печах или в контейнерах, загружаемых в печь. Рабочее пространство печи заполняется очищенным от кислорода и влаги защитным газом (аргоном, гелием, азотом или азотно-водородной смесью), создается его избыточное давление, обеспечивающее непрерывное протекание газа. При таком способе пайки применение флюсов не требуется.

При печной пайке обеспечивается точное соблюдение задаваемых параметров пайки — времени нагрева и температуры пайки. Процесс пайки легко автоматизируется.

Печную пайку широко применяют при изготовлении трубопроводов из стали 20А и 12Х18Н10Т. Трубопроводы из стали 20А паяют медью (М1, М2, М3) в азотно-водородной смеси (массовая доля водорода 8...10 %) без применения флюса. Припой вносят в стык в виде медных закладных колец или наносят на паяемые поверхности электролитическим способом слой меди толщиной 10...20 мкм.

Высокую стабильность качества и скорость пайки труб диаметрами 20...40 мм и выше обеспечивает индукционный нагрев. Тонкостенные трубопроводы паяют на высокочастотных установках мощностью 8 и 30 кВт с рабочей частотой 300...450 и 150...250 кГц соответственно. При пайке часто используют одновитковые индукторы из трубок диаметром 8...10 мм, профилированного или круглого сечения. При большем диаметре труб применяются двухвитковые индукторы.

Пайку проводят с применением газовой защиты в среде аргона. Аргон продувается специальной форсункой через паяемые трубы и через зазор между паяемым стыком и нагревателем. Подачу аргона прекращают после охлаждения соединения до температуры 200...250 °С.

В целях улучшения затекания припоя в паяльный зазор и исключения образования непропаев при неравномерном зазоре в процессе пайки можно осуществлять вибрацию одной трубы в осевом, другой — в радиальном направлениях.

При пайке трубопроводов самофлюсующими припоями в среде аргона и на воздухе, когда форма и размеры паяемых деталей исключают возможность применения кольцевых индукторов, используются разъемные индукторы (рис. 5, 6).

Трубы небольших размеров подвергают индукционной пайке в специальных герметичных камерах, заполняемых защитными газами. В стенки камеры вмонтированы индуктор и прозрачные окна, а также эластичные резиновые перчатки.

Скорость индукционного нагрева труб диаметрами до 42 мм исчисляется секундами (до 10...15 с), при радиационном нагреве — минутами (до 4 мин).

Паяное соединение контролируют визуально, ультразвуковым и радиографическим методами и испытанием на герметичность.

При соединении алюминиевых труб применяют аргонодуговую сварку. Однако для тонкостенных трубопроводов малого диаметра ее применение вызывает определенные трудности. В этом случае наиболее технологичным

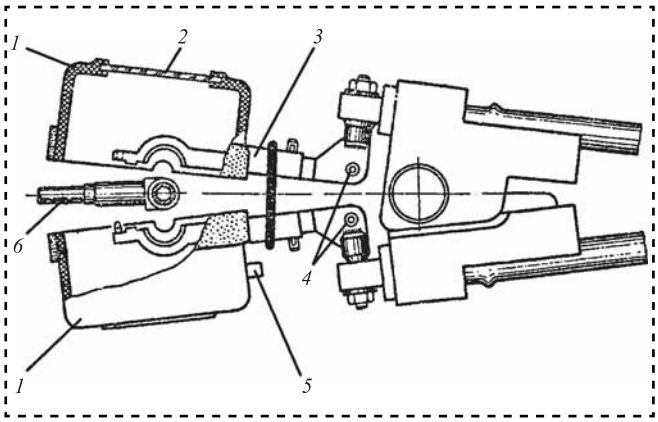


Рис. 5. Разъемный индуктор для пайки в среде аргона:
1 — крышки (левая и правая); *2* — смотровое стекло; *3* — индуктор; *4* — место подвода охлаждающей воды; *5* — место подвода аргона; *6* — паяемая деталь

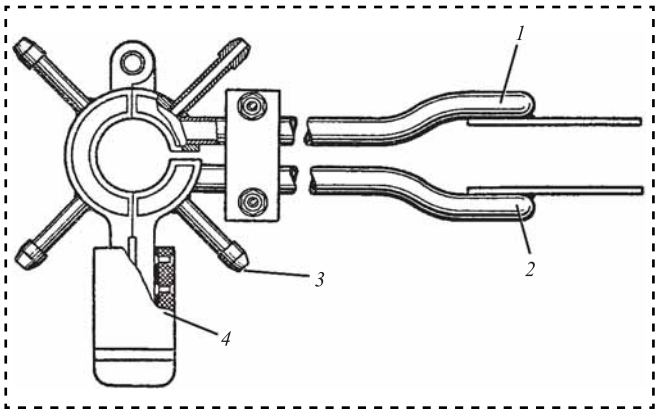


Рис. 6. Разъемный индуктор для пайки на воздухе:
1 и *2* — левый и правый контакты; *3* — подвод охлаждающей воды; *4* — ручка

является способ контактно-реактивной пайки с нанесением гальванического покрытия толщиной 5...10 мкм на соединяемые поверхности трубок.

В соответствии с диаграммой состояния алюминий—магний—медь при нагреве в результате растворно-диффузионного процесса на границе паяемый металл—покрытие при температуре 507 °С образуется расплав эвтектического состава (63 % Cu, 6 % Al, 31 % Mn), выполняющий роль припоя. Пайку проводят в среде аргона. Для защиты соединяемых поверхностей стык помещают в кольцевую камеру, в которую подают аргон как снаружи (в камеру), так и во внутрь трубопровода. При пайке используют ниобиевый нагреватель сопротивления. Время нагрева составляет примерно 80 с. При сборке соединений создают минимальные зазоры в стыке. Для плотного прилегания соединяемых поверхностей на наружной трубе создается давление обжатия, обеспечивающего создание требуемых зазоров. Так, при пайке алюминиевых трубопроводов сечением 8×1 мм с шириной нахлестки 12...15 мм сборочные зазоры составляют 0,08...0,12 мм.

Способ контактно-реактивной пайки расширяет технологические возможности изготовления трубопроводных систем.

Трубопроводные системы могут являться основным рабочим узлом промышленного оборудования. В паровом котле находится протяженная трубопроводная система, содержащая многочисленные соединения труб. Температура эксплуатации такой трубопроводной системы достигает 600 °С.

При соединении таких труб с применением газовой и электрической сварки обеспечивается необходимая надежность системы, но не обеспечивается требуемая производительность труда. При контактной сварке, обеспечивающей необходимые объемы производства, образуется внутренний грат, снижающий пропускную способность трубопроводной системы, а также затруднен контроль качества таких сварных соединений неразрушающими методами [11].

Избежать указанных недостатков удается при применении высокотемпературной пайки, обеспечившей необходимые качество и надежность трубопроводной системы (рис. 7). Площадь паяного соединения превышает площадь рабочего сечения труб, что обеспечивает необходимую прочность паяных соединений.

Проводили пайку труб из стали марки 12Х1МФ диаметрами 12...76 мм с толщинами стенок 1...6 мм с применением припоя П100С и флюса ПВ201.

Для пайки могут применяться экзотермический, индукционный и электроконтактный способы нагрева.

При экзотермическом способе нагрева паяльная смесь размещается внутри соединения нанесением на стыкуемые торцы и закрепляется с помощью связующего вещества (например, акрилового лака) с последующей стыковкой. Для сборки применяют специальную оснастку, а в качестве источника нагре-

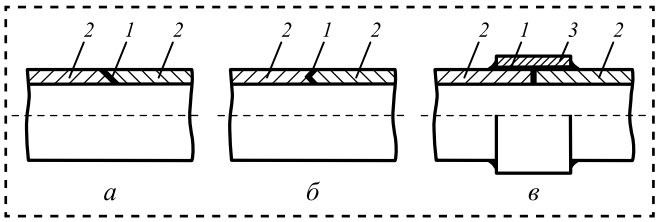


Рис. 7. Косостыковое (*а*), клинообразное (*б*) и муфтовое (*в*) соединения труб из стали 12Х1МФ паровых котлов: *1* — паяный шов; *2* — соединяемые трубы; *3* — муфта

ва — термитные шашки, состоящие из смеси порошков магния и железной окалины.

При индукционной пайке припой применяется как в виде пасты, так и в виде закладных деталей, получаемых прессованием подготовленного паяльного порошка, содержащего припой и флюс. Сборку и пайку проводят в центрирующей оснастке. Нагрев проводят на индукционной установке с применением кольцевого индуктора. Время пайки стыка труб сечением 32×6 мм составляет 2,5...3 мин, что в два раза меньше нормируемого времени при сварке труб плавлением.

Пайку труб с нагревом электросопротивлением осуществляют на контактных стыковых сварочных машинах. При пайке обеспечивается достаточная равномерность нагрева паяемого соединения. В соединении применяется косостыковая форма кромок соединяемых труб.

При всех способах нагрева в паяемом соединении формируется идентичная микроструктура, обусловленная высокой интенсивностью растворно-диффузионных процессов. Механические испытания показали, что прочность паяных соединений, полученных при разных способах нагрева, удовлетворяет требованиям во всем интервале рабочих температур.

Промышленные испытания паровых котлов с паяными пароперегревателями (47 000 ч) показали, что в процессе эксплуатации не произошло недопустимого уменьшения прочности паяных соединений и существенного изменения структуры шва. Проведенные исследования открыли широкие возможности по модернизации производства в котлостроении.

О высокой степени надежности паяных соединений свидетельствует широкое применение высокотемпературной индукционной пайки в космическом центре им. Кеннеди при монтаже трубопроводов системы заправки самовоспламеняющимся (сверхреакционноспособным) ракетным топливом космических пилотируемых аппаратов. С помощью этой системы ракетное топливо перекачивается из хранилищ, расположенных на пусковой платформе, в космический аппарат.

Трубы, изготовленные из коррозионностойкой стали 304 диаметрами 6,35...50,8 мм, соединяют посредством муфт (фитингов), имеющих две внутренние кольцевые канавки, в которые запрессовывается кольцо припоя. В качестве припоя применяли сплав из золота (82 %) и никеля (18 %). Припой хорошо затекает в узкие зазоры, создавая качественные и надежные соединения и обеспечивая высокую коррозионную стойкость. Пайку проводили без применения флюса в среде проточного аргона. Температура плавления припоя 949 °С. Температура пайки — 1020 °С. Максимальная температура пайки не должна превышать температуру плавления припоя более чем на 93 °С, т.е. не должна быть выше 1060 °С.

Процесс пайки соединений трубопровода автоматизирован. Комплект оборудования смонтирован в передвижном закрытом трейлере. Работы по пайке могут проводиться на расстоянии до 183 м от трейлера. Трейлер имеет приспособления для загрузки и выгрузки переносного комплекта оборудования.

Способ индукционной пайки применялся при монтаже трубопроводных систем в посадочном модуле космического корабля "Аппалон". При пайке применяли припой на золотой основе. Контроль качества соединений проводили рентгеновским методом. Муфтовые паяные соединения дают выигрыш в весе. При использовании резьбовых соединений трубопроводов их надежность составляет 85 %, паяных — 99 %.

При изготовлении космического корабля, запущенного к Юпитеру и несущего на борту аппарат для зондирования планеты, проводилась вакуумная пайка охлаждающей системы двигателей торможения и коррекции орбиты с применением припоя на золотой основе, созданного в ФРГ. В России пайка является основным способом соединения конструкций жидкостного ракетного двигателя РД-170.

Библиографический список

1. **Китаев А.М., Губин А.И.** Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. М.: Машиностроение, 1972. 132 с.

2. **Чекунов И.П.** Композиционный припой для пайки коррозионно-стойких и жаропрочных сталей // Сварочное производство. 1996. № 3. С. 32—33.

3. **Чекунов И.П.** Высокотемпературная пайка трубопроводов из коррозионно-стойкой стали. М.: Машиностроение, 1988. 76 с.

4. **Чекунов И.П.** Соединение стальных трубопроводов композиционным припоем с пониженной температурой пайки // Сварочное производство. 1990. № 2. С. 31.

5. **Пайка** металлов: справочник / под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.

6. **Работоспособность** паяных телескопических медно-алюминиевых соединений / С.В. Лашко и др. // Сварочное производство. 1976. № 4. С. 29—30.

7. **Чекунов И.П.** Устранение непропаев при высокотемпературной пайке стальных трубопроводов // Сварочное производство. 1979. № 9. С. 49—50.

8. **Сагалович В.В., Черникова Р.В.** Пайка телескопических соединений со ступенчатым рифлением одной из деталей // Сварочное производство. 1990. № 1. С. 29.

9. **Пайка** особотонкостенных трубопроводов без соединительной арматуры / И.П. Чекунов и др. // Сварочное производство. 1980. № 10. С. 33—35.

10. **Чекунов И.П.** Конструкция сферически-телескопического соединения трубопроводов // Сварочное производство. 2000. № 3. С. 40—42.

11. **Пайка** труб поверхностей нагрева из стали 12Х1МФ / А.В. Орлов и др. // Тяжелое машиностроение. 1991. № 4. С. 24—27.

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. М., 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. М., 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. М., 1993.

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

(Окончание следует)

УДК 681.5.08

А.А. Плешаков, М.Г. Кристаль, *д-р техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: akrense@yandex.ru

Теоретическая оценка передаточной функции и погрешности измерения автоматического пневмоэлектронного устройства*

Предложена математическая модель временнóго преобразования в пневмоэлектронных измерительных устройствах, где деталь базируется в призме со встроенным в ее поверхность измерительным соплом. Модель учитывает смешанный характер дросселирования воздуха в зазоре между срезом измерительного сопла и поверхностью измеряемой детали и позволяет оценить передаточную функцию и погрешность измерения устройств такого типа.

Paper covers a proposed analytical model of temporal conversion in a new pneumo-electronic gauge where the target piece is located in a channel of a V-block, face of the said channel containing the exit section of a measuring nozzle. The model allows computation of transfer function and measurement error of the gauge with respect to transitional mode of air flow in a throttle formed by the exit section of the measuring nozzle and the surface of the target piece.

Ключевые слова: *измерение линейных размеров, измерение диаметров, пневматические методы измерения, временнóе преобразование.*

Keywords: *displacement measurement, external diameter measurement, pneumatic gauging, temporal conversion.*

Введение

Для измерения диаметров твердосплавных зубков перед селективной сборкой буровых коронок предложено пневмоэлектронное измерительное устройство [1—3], реализующее преобразование линейного размера D детали в интервал времени $t_{изм}$ истечения из измерительной камеры сжатого воздуха (временнóе преобразование — $D \to t_{изм}$).

В предложенном устройстве (рис. 1) измеряемую деталь *1* устанавливают в базирующую призму *2*, на одной из поверхностей которой на расстоянии L от ее вершины расположено цилиндрическое измерительное сопло *3* диаметром d. Плоскость среза сопла *3* и базирующая поверхность призмы совпадают. Сопло *3* соединено с измерительной камерой (ИК) *4* объемом V, которая объединена с камерой преобразователя *5* давления $p(t)$ сжатого воздуха в напряжение $u(t)$ и сообщается со стабилизированным источником сжатого воздуха через канал клапана *6*, управляемого блоком управления (БУ) *7*. Сигнал $u(t)$ поступает на входы компараторов *8*, *9*, выходы которых управляют соответственно пуском и остановом таймера *10*.

В начале измерительного цикла (рис. 2) клапан *6* открыт, и по нему сжатый воздух с рабочим давлением $p_р$ от источника поступает в ИК *4* и истекает в атмосферу через зазор между поверхностью измеряемой детали *1* и срезом сопла *3*. Давление $p(t)$ воздуха в ИК *4* устанавливается на уровне $p_{изм} = f(D)$. В момент времени t_0 БУ *7* закрывает клапан *6*. Вследствие этого прекращается подача в ИК *4* сжатого воздуха, а воздух с давлением $p(t_0) = p_{изм}$, заключенный в ИК *4*, продолжает истекать в атмосферу. В момент $t_в$ давление $p(t)$ воздуха в ИК *4* достигает верхнего граничного значения $p_в$, что приводит к срабатыванию компаратора *8* и запуску таймера *10*. Затем в момент $t_н$ давление $p(t)$ уменьшается

* Работа выполнена в рамках гранта № 35/762—15 для молодых ученых Волгоградского государственного технического университета.

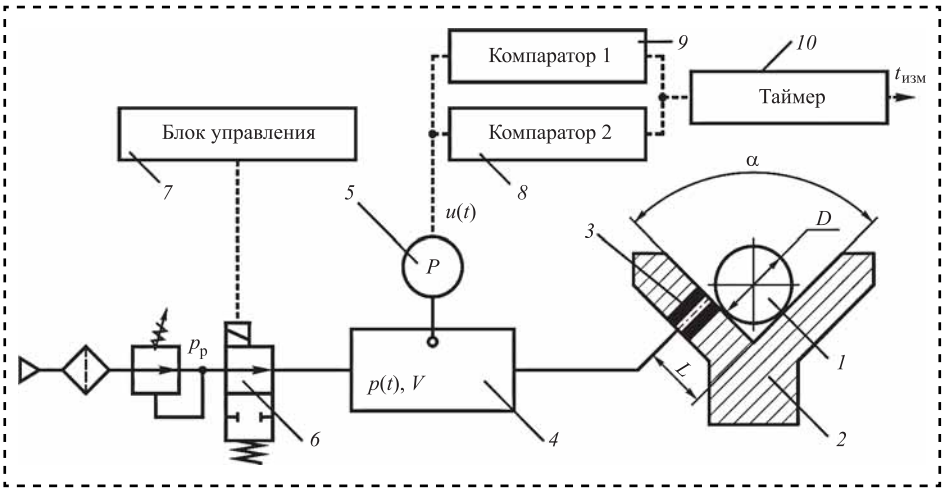


Рис. 1. Пневмоэлектронное измерительное устройство

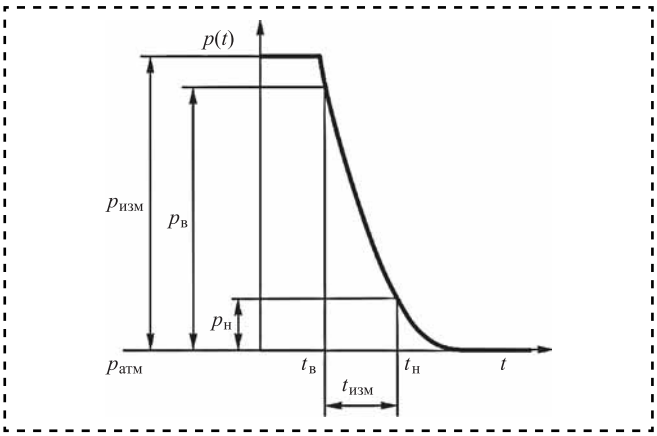


Рис. 2. Изменение давления *p*(*t*) в измерительной камере в процессе временно́го преобразования

до значения $p_н$, и компаратор *9* останавливает таймер *10*. Величина интервала $t_{изм} = (t_н - t_в)$, зарегистрированная таймером *10*, позволяет оценить диаметр *D* измеряемой детали, через который воздух из ИК *4* истекает в атмосферу, поскольку *D* определяет площадь *F* проходного сечения дросселя, образованного срезом измерительного сопла *3* и поверхностью измеряемой детали *1*.

Влияние конструктивных параметров устройств такого типа на их передаточную функцию $t_{изм} = f(D)$ и погрешность Δ измерения исследовано экспериментально [1]. Для оценки этих характеристик на этапе проектирования контрольно-сортировочных автоматов, в состав которых входят такие устройства, предложена математическая модель временно́го преобразования, учитывающая смешанный характер дросселирования воздуха в зазоре между срезом измерительного сопла и поверхностью измеряемой детали.

Математическая модель временно́го преобразования

Процесс истечения сжатого воздуха из глухой камеры через дроссель описывают уравнением [Залманзон Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. М.: Наука, 1973]:

$$\frac{V}{RT}\frac{dp(t)}{dt} = -G, \qquad (1)$$

где *R* — удельная газовая постоянная для сухого воздуха, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; *T* — температура воздуха, К; *G* — массовый расход воздуха через дроссель, кг·с$^{-1}$.

Дроссели подобного типа [Ибрагимов И.А., Фарзане Н.Г., Илясов Л.В. Элементы и системы пневмоавтоматики. М.: Высшая школа, 1975] при расчете расхода часто рассматривают как турбулентные [Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во академии наук СССР, 1961] и принимают расход *G* равным $G_т$, который вычисляют [Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во академии наук СССР, 1961] как:

$$G_т = \begin{cases} Fp(t)\left(\dfrac{2}{k+1}\right)^{k^{-1}}\sqrt{\dfrac{2\,k}{(k+1)\,RT}}, & \text{если } p(t) > p_а\left(\dfrac{2}{k+1}\right)^{\frac{-k}{k-1}}, \\ Fp_а^{k^{-1}}\left[p(t)\right]^{(k-1)k^{-1}}\sqrt{\dfrac{2k}{(k-1)RT}\left[1-\left(\dfrac{p_а}{p(t)}\right)^{(k-1)\,k^{-1}}\right]}, & \text{если } p(t) < p_а\left(\dfrac{2}{k+1}\right)^{\frac{-k}{k-1}}, \end{cases} \qquad (2)$$

где *k* — показатель адиабаты воздуха; $p_а$ — атмосферное давление, Па.

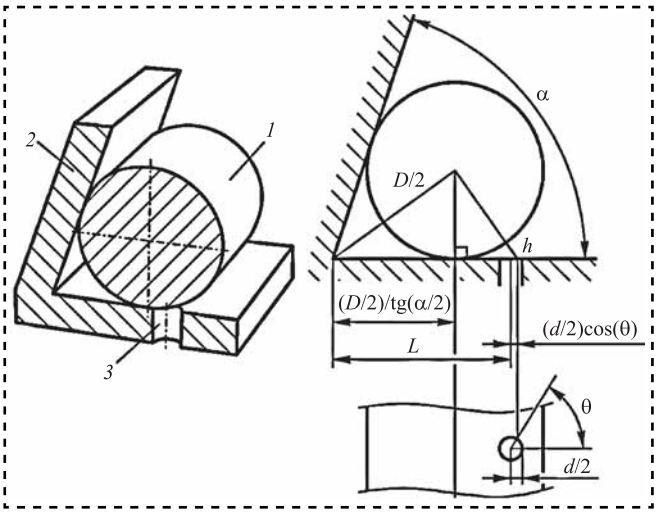


Рис. 3. Схема для расчета площади *F* проходного сечения выходного дросселя

Для вычисления площади F проходного сечения дросселя, образованного срезом измерительного сопла *3* и цилиндрической поверхностью измеряемой детали *1*, принята схема, приведенная на рис. 3, где α — угол при вершине базирующей призмы *2*.

Тогда площадь F можно вычислить как:

$$F = \int_{\theta=0}^{2\pi} (d/2)\,h\,d\theta = \int_{\theta=0}^{2\pi} (d/2)\left(\sqrt{\left[L-(D/2)/\operatorname{tg}(\alpha/2)+(d/2)\cos(\theta)\right]^2+(D/2)^2}-(D/2)\right)d\theta. \quad (3)$$

Решая уравнение (1) с учетом выражений (2) и (3) при условии $p(t_в) = p_в$ и $p(t_н) = p_н$ для различных значений D найдена серия результатов $t_{изм} = (t_н - t_в)$ временнóго преобразования и по ним построена передаточная функция $t_{изм} = f(D)$ устройства.

Сравнение вычисленных таким образом функций с экспериментальными данными [1] показало, что расчетные значения $t_{изм}$ превышают опытные, причем разница между ними тем больше, чем больше диаметр D измеряемой детали. Выдвинута гипотеза о том, что при истечении воздуха через рассматриваемый дроссель возникает эффект прилипания потока к цилиндрической поверхности детали, что приводит к смешанному характеру дросселирования. В результате возникает ошибка расчета, так как выражение (2) характеризует расход воздуха при турбулентном дросселировании. Для того чтобы учесть этот эффект, введен поправочный функционал $\psi(D) = t^{т}_{изм}(D)/t^{э}_{изм}(D)$, равный отношению теоретического $t^{т}_{изм}$ и экспериментального $t^{э}_{изм}$ значений:

$$G = \psi(D)G_т.$$

Из эксперимента [1] известно, что в состав сигнала $u(t)$ преобразователя давления входит высокочастотная помеха с амплитудой Δ_u, которая является источником погрешности срабатывания компараторов. Решая уравнение (1) с условиями $p\left(t_в^-\right) = \left(p_в - \Delta_u\right)$, $p\left(t_в^+\right) = \left(p_в + \Delta_u\right)$, $p\left(t_н^-\right) = \left(p_н - \Delta_u\right)$ и $p\left(t_н^+\right) = \left(p_н + \Delta_u\right)$, получаем значения $t_в^-$, $t_в^+$, $t_н^-$ и $t_н^+$ (рис. 4). Тогда суммарную погрешность Δ_t срабатывания компараторов можно оценить как:

$$\Delta_t = \left(t_н^+ - t_в^-\right) - \left(t_н^- - t_в^+\right).$$

Чтобы оценить влияние Δ_t на погрешность Δ измерения, используя обратную передаточную функцию $\widehat{D} = f\left(t_{изм}\right)$, вычисляем:

$$\Delta = \widehat{D}\left(t_н^+ - t_в^-\right) - \widehat{D}\left(t_н^- - t_в^+\right).$$

Для оценки адекватности предложенной модели вычислены передаточные функции $t_{изм} = f(D)$ и погрешность Δ в измерительных диапазонах D = 6...6,22 мм и D = 10...10,22 мм и

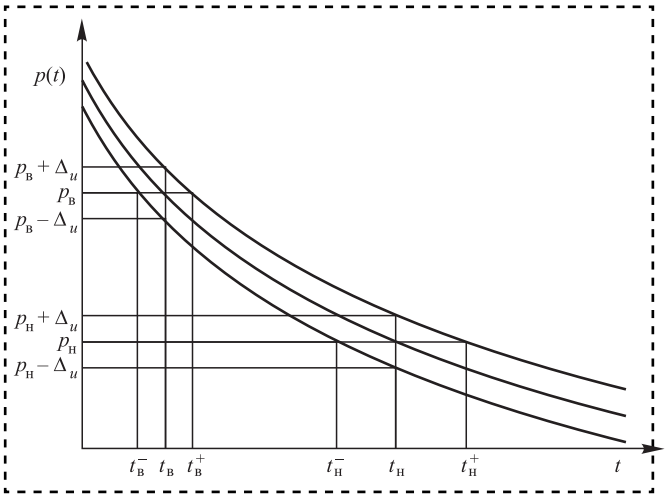


Рис. 4. Схема для оценки влияния шума Δ_u в составе сигнала $u(t)$ на результат $t_{изм}$ временнóго преобразования

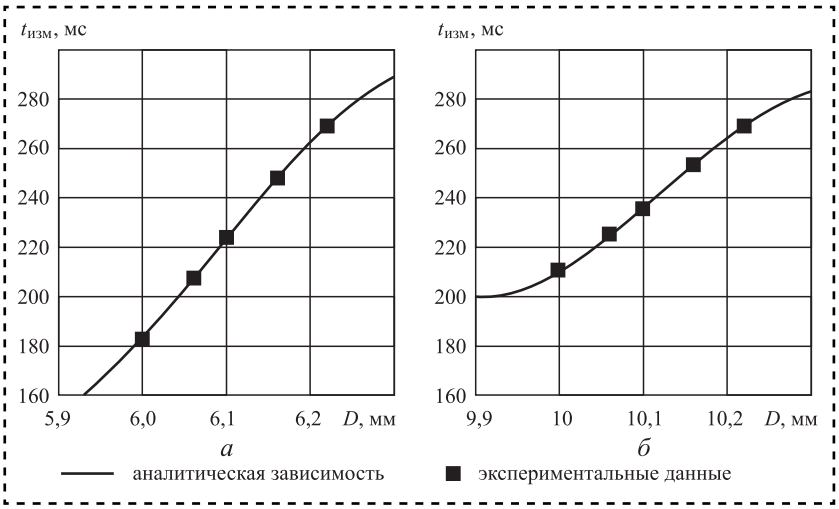


Рис. 5. Аналитические и экспериментальные передаточные функции в измерительном диапазоне:
а — D = 6...6,22 мм; *б* — D = 10...10,22 мм

проведено сравнение их с экспериментальными данными [1] (рис. 5).

Параметры эксперимента [1], принятые для расчета: $V = 16{,}6 \cdot 10^{-6}$ м^3, d = 1 мм, $p_в$ = 130 кПа, $p_н$ = 11 кПа, Δ_u = 20 Па и T = 297,15 К; α = 30°, l = 350 мкм для D = 6...6,22 мм; α = 45°, l = 700 мкм для D = 10...10,22 мм.

Установлено, что расчетные значения принадлежат доверительному интервалу для опытных данных с доверительной вероятностью P = 0,95 [5], что подтверждает адекватность предложенной модели. Для определения доверительного интервала предварительно проверена и принята гипотеза о нормальном распределении экспериментальных данных (объем выборки n = 400) [6].

При расчете по предложенной модели погрешности измерения разработанного пневмоэлектронного измерительного устройства получены значения: в диапазоне D = 6...6,22 мм — Δ = ±0,35 мкм и в диапазоне D = 10...10,22 мм — Δ = ±0,46 мкм, соответственно, при экспериментальных [1] значениях ±0,27 мкм и ±0,45 мкм. Вычисленные значения Δ превышают экспериментальные, что идет в запас расчета.

Заключение

Предложенная математическая модель временнóго преобразования, учитывающая смешанный характер дросселирования воздуха в зазоре между срезом измерительного сопла и поверхностью измеряемой детали в пневмоэлектронном измерительном устройстве [1], адекватно описывает экспериментальные данные. Ее можно использовать для расчета передаточной функции и погрешности измерения при проектировании измерительных устройств такого типа.

Библиографический список

1. **Плешаков А.А., Кристаль М.Г.** Экспериментальное исследование пневмоэлектронного измерительного устройства для автоматической сортировки деталей перед селективной сборкой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 3. С. 23—27.

2. **Пневмоэлектронное** устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам: пат. на полезную модель RUS 154374, МПК G01B13/00 / А.А. Плешаков, А.Ю. Горелова, М.Г. Кристаль. ВолгГТУ 20.08.2015.

3. **Программа** управления устройством для сортировки деталей на группы по линейным размерам: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2014616406 (РФ) / Плешаков А.А., Чан К.Т., Горелова А.Ю. Измайлов А.Д., Кристаль М.Г. 2014.

4. **Bokov V.** Nozzle-flapper sensor mechanistic and statistical concurrent modeling // Measurement. 2005. N 37. P. 47—61.

5. **Jay L. Devore.** Probability and Statistics for Engineering and Sciences. Brooks/Cole, Cengage learning, 2012. 775 p.

6. **Р 50.1.033-2001.** Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа хи-квадрат. М.: Стандартинформ, 2006. 87 с.

УДК 621.744.37

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева,** *канд. экон. наук,* **М.И. Бойчук**
(Московский технологический университет)
E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

Сборка корпусных установок с амальгамными лампами типа УДВ-А для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением

Представлены корпусные установки с амальгамными лампами для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением, их основные параметры и объемно-массовые характеристики, производительность и дозы ультрафиолетового облучения при различных расходах воды и различных коэффициентах пропускания ультрафиолетового излучения.

The article presents the installation of water disinfection by ultraviolet radiation from the housing amalgam lamps. The basic parameters and body-mass characteristics of plants. Presents the specifications, performance, and the UV dose at different flow rates of water and various transmittance UV installations of DUV-A.

Ключевые слова: установка, ультрафиолетовое излучение, обеззараживание воды, сборка, параметры, амальгамные лампы, облучение.

Keywords: installation, ultraviolet disinfection of water, construction, parameters, amalgam lamps, irradiation.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение для обеззараживания воды начали использовать еще в конце XIX — начале XX веков, постепенно изучая и понимая природу и механизм его фотобиологического воздействия (когда энергия кванта света сопоставима с энергией химической связи).

В настоящее время УФ-технологии динамично развиваются в промышленности, медицине, коммунальном хозяйстве, энергетике, сельском хозяйстве и т.д. Это развитие стало возможным благодаря мощным высокоэффективным источникам УФ-излучения и аппаратам на их основе [1—3].

Установки корпусные с амальгамными лампами типа УДВ-А предназначены для обеззараживания воды, используемой в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения; открытых и закрытых технических системах промышленных предприятий; сточных вод, отводимых в водостоки, на рельеф и поля орошения. Установки укомплектованы амальгамными газоразрядными бактерицидными лампами низкого давления. Установки могут быть продольного (оси ламп совпадают с направлением воды в корпусе установки) или поперечного обтекания (оси ламп перпендикулярны направлению воды в корпусе установки). Климатическое исполнение установок — УХЛ категории размещения 4 по ГОСТ 15150—69.

Установки должны удовлетворять "Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому контролю" (Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям Таможенного Союза), а также МУ 2.1.4.719—98 "Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды" и др.

Установки обеспечивают обеззараживание воды УФ-излучением до норм, установлен-

Таблица 1

Основные параметры установок

Тип установки	Производительность, $м^3/ч$	Условный диаметр входного и выходного патрубков $D_у$, мм	Рабочее давление, $кгс/см^2$ (МПа), не более	Электропитание: напряжение, В; частота, Гц	Потребляемая мощность, кВт, не более	Тепловыделение в пульте (шкафу) управления/шкафах ЭПРА, кВт, не более
УДВ-1А	1,5...16	50	10 (1)	220; 50/60	0,28	0,035
УДВ-2А	1,5...20	50	10 (1)	220; 50/60	0,56	0,06
УДВ-3А	10...105	150	16 (1,6)	220; 50/60	0,84	0,085
УДВ-4А	15...115	150	10 (1)	220; 50/60	1,12	0,115
УДВ-5А	20...125	150	10 (1)	220; 50/60	1,4	0,15
УДВ-7А	30...150	150	10 (1)	220; 50/60	2	0,2
УДВ-12А	50...360	250	10 (1)	380; 50/60	3,5	0,35
УДВ-18А	75...500	300	10 (1)	380; 50/60	5	0,5
УДВ-36А	150...950	400	10 (1)	380; 50/60	10	1
Примечание. Тип лампы ДБ300.						

ных СанПиН 2.1.4.1074—01 "Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения", СанПиН 2.1.5.980—00 "Гигиенические требования к охране поверхностных вод" и др.

Собранные установки состоят из камеры обеззараживания и шкафов (пульта) управления (табл. 1, 2).

Внешний вид и габаритные размеры камер обеззараживания и электрических шкафов установки обеззараживания типа УДВ-А приведены на рис. 1 и 2.

Средний срок службы установок до капитального ремонта — 12 лет, до списания — 25 лет. Работоспособность установок должна обеспечиваться в следующих условиях: температура окружающего воздуха от +1 до +35 °С; относительная влажность воздуха от 60 % при температуре +20 °С до 80 % при температуре +25 °С; давление воздуха от 86,6 кПа (650 мм рт. ст.) до 106,7 кПа (800 мм рт. ст.); температура обрабатываемой воды от +1 до +30 °С; длительные колебания напряжения питания ±10 % от номинального значения; кратковременные

Таблица 2

Основные объемно-массовые характеристики установок

Тип установки	Объем камеры обеззараживания, $м^3$	Масса камеры обеззараживания в сухом состоянии, т, не более	Масса пульта (шкафа) управления, кг, не более
УДВ-1А	0,0075	0,017	22
УДВ-2А	0,015	0,045	8
УДВ-3А	0,047	0,051	45
УДВ-4А	0,065	0,09	8
УДВ-5А	0,065	0,09	8
УДВ-7А	0,1	0,1	8
УДВ-12А	0,22	0,27	200
УДВ-18А	0,26	0,3	200
УДВ-36А	0,47	0,42	200

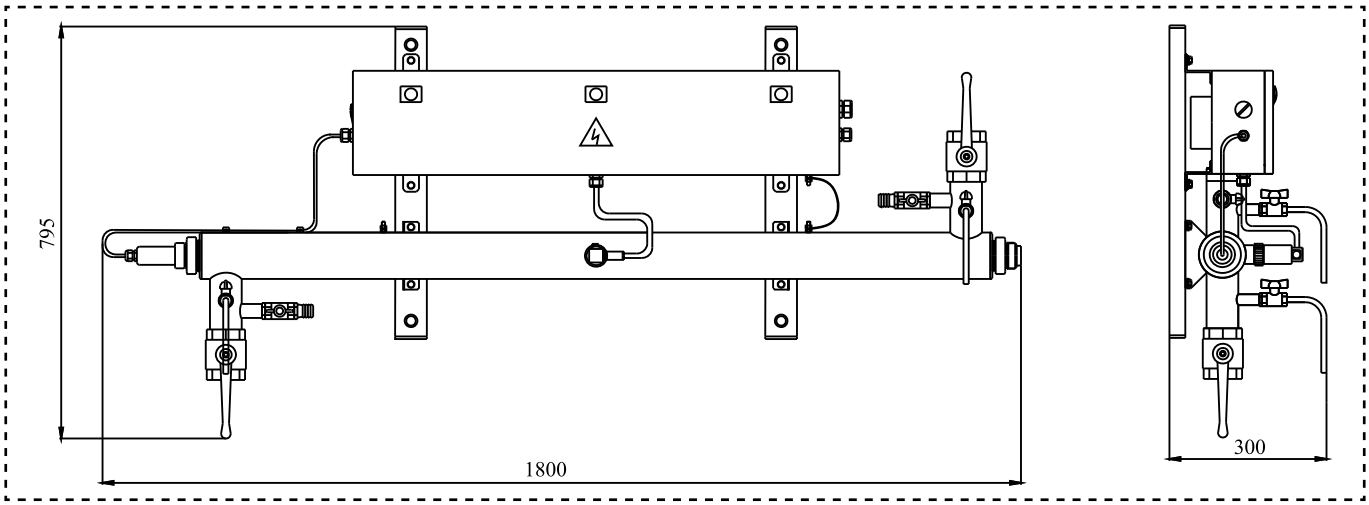


Рис. 1. Габаритный чертеж камеры обеззараживания установки УДВ-А

колебания напряжения питания не более 15 % от номинального значения за время до 0,5 с.

Сопротивление изоляции установок, измеренное при нормальных значениях климатических факторов внешней среды, в соответствии с "Правилами устройства электроустановки" (ПУЭ) должно быть не менее 1,0 МОм.

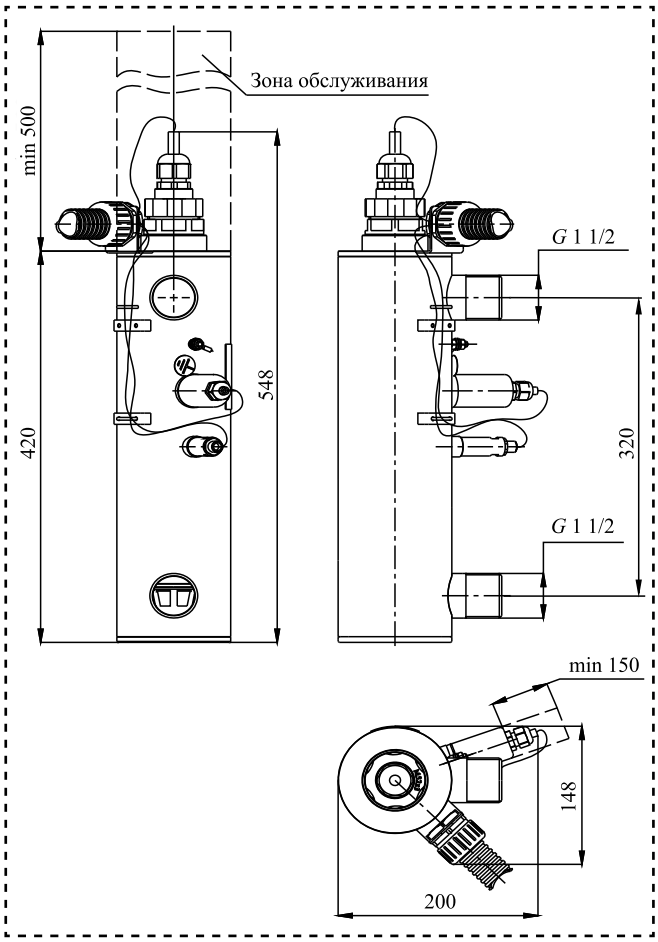


Рис. 2. Габаритный чертеж камеры обеззараживания

Технические характеристики установки типа УДВ-А

Производительность установки, м^3/ч . . .5...15
Условный диаметр входного и выходного патрубков камеры обеззараживания, мм . . . . . .40 (*G* 1 1/2)
Рабочее давление в камере обеззараживания, МПа (бар), не более. 1 (10)
Разрежение в камере обеззараживания, МПа (бар), не более. . . . . .−0,01 (−0,1)
Тип лампы . . . . . .DB 120HO-32
Число ламп в камере. 1
Срок службы лампы, ч, не менее 12 000
Число включений/выключений в течение срока службы, не более 5000
Напряжение питания, В . . . . . .220 ± 10 %
Частота питающего напряжения, Гц. . . .50
Потребляемая мощность, Вт, не более . .140
Коэффициент мощности, не менее. 0,96
Тепловыделение в пульте управления, Вт, не более. 15
Габаритные размеры, мм:
  камера обеззараживания . . . . . .200×148×548
  пульт управления. . . . . .380×163×300
Масса, кг, не более:
  камера обеззараживания 5
  пульт управления. 10
Код IP:
  камеры обеззараживания. 65
  пульта управления 54
Объем камеры обеззараживания, л. 3
Длина ламповых кабелей, м 2,5

Производительность собранных установок типа УДВ-А представлена в табл. 3.

Таблица 3

Производительность установок обеззараживания УДВ-А

Обрабатываемая вода	Коэффициент пропускания УФ-излучения на длине волны 254 нм τ, %	Доза облучения*, мДж/см^2	Производительность УФ-установки Q_{max}, м^3/ч, не более
Вода питьевая из поверхностного источника	70	25	5,8
Вода питьевая из подземного источника; вода из любого источника, очищенная с применением сорбционных методов очистки; вода бассейнов	80	25	7,6
Вода питьевая из подземного источника; вода из любого источника, очищенная с применением сорбционных методов очистки; вода бассейнов при неблагоприятной эпидемической ситуации	80	40	5
Вода из любого источника, очищенная с применением мембранных методов очистки (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос)	90	25	9,9
Вода из любого источника, очищенная с применением мембранных методов очистки (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос) при неблагоприятной эпидемической ситуации	90	40	6,2

* МУ 2.1.4.719—98 "Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды".

Электрическая изоляция электрооборудования установки должна выдерживать приложение переменного синусоидального напряжения 1000 В с частотой 50 Гц в течение одной минуты. Установки снабжены датчиком интенсивности УФ-излучения и имеют сигнализацию о снижении интенсивности УФ-излучения и выходе из строя УФ-ламп и ЭПРА.

Дозы УФ-облучения при различных расходах воды и различных коэффициентах пропускания УФ-излучения установок типа УДВ-А представлены в табл. 4.

Таблица 4

Дозы УФ-облучения, мДж/см^2, в зависимости от расхода воды и коэффициента пропускания УФ-излучения

Q, м^3/ч	Коэффициент пропускания УФ-излучения τ								
	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
5	26	29	32	36	40	44	49	55	60
6	22	24	27	30	33	37	41	46	50
7	18	21	23	26	29	32	35	39	43
8	16	18	20	23	25	28	31	34	38
9	14	16	18	20	22	25	27	30	34
10	13	15	16	18	20	22	25	27	30
11	12	13	15	16	18	20	22	25	27
12	11	12	14	15	17	19	21	23	25
13	10	11	12	14	15	17	19	21	23
14	9	10	12	13	14	16	18	20	22
15	9	10	11	12	13	15	16	18	20

Технология УФ-обеззараживания воды или воздуха в большинстве задач не может рассматриваться в отрыве от всей технологической цепи очистки среды, за исключением частных случаев. Вода является сложной многокомпонентной системой, где микроорганизмы в силу их различной природы находятся в разных формах и в различных условиях, поэтому полное их удаление может быть технологически и экономически эффективно достигнуто только в совокупности применения необходимого набора технологий для решения всех задач очистки на конкретном объекте.

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Установки для обеззараживания воздуха и воды // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 41—46.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 7. С. 25—28.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е.** Системы обеззараживания ультрафиолетом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 2. С. 44—48.

VI Международная научно-техническая конференция

«Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня»

17—19 октября 2016 года *в Москве на базе РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина состоится VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня». В рамках Конференции будет работать Международная молодежная школа «Химмотология и физико-химическая гидрогазодинамика: программные пакеты, модели, методы».*

В программе предусмотрено проведение пленарных и секционных заседаний, лекций и мастер-классов, где ведущие российские и зарубежные ученые и специалисты проведут обмен опытом в области химмотологии, трибологии, экологии, супервычислений, математического моделирования в инженерном деле и программирования.

За участие в работе научно-технической конференции и молодежной школы предусмотрено вручение сертификатов и грамот.

Оргкомитет приглашает преподавателей, аспирантов, студентов, а также специалистов по обозначенной тематике принять участие в работе научно-технической конференции и молодежной школы.

Дополнительная информация: http://chemmotology2016.icp.ac.ru/

УДК 621.838.222

М.П. Шишкарев, *д-р техн. наук,* **Чан Ван Дык**
(Донской государственный технический университет)
E-mail: shishkarevm@mail.ru, ductranvan2311@gmail.com

Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения

Исследована точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения с обособленным силовым замыканием при увеличении максимального коэффициента трения по отношению к прогнозируемому значению. Найдена характеристика точности срабатывания муфты в указанном режиме работы. Приведен выбор рациональных параметров муфты, позволяющих снизить влияние повышенного коэффициента трения на точность срабатывания муфты.

Investigated the accuracy of triggering adaptive clutch of the second generation with a separate power circuit when increasing the maximum coefficient of friction with respect to the predicted value. Found feature precision of the clutch in the specified mode. Given the choice of rational parameters of the coupling, allowing to reduce influence of high coefficient of friction on the accuracy of clutch operation.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, точность срабатывания, коэффициент трения, коэффициент усиления.

Keywords: adaptive friction clutch, the accuracy of the response, coefficient of friction, the coefficient of amplification.

Исследование адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения с обособленным силовым замыканием показало, что точность ее срабатывания зависит от коэффициента усиления (КУ) обратной связи, величина которого рассчитывается в зависимости от ширины интервала изменения коэффициента трения между фрикционными парами m и максимальной величины последнего f_{max} (обычно $m = 8$ и $f_{max} = 0{,}8$) [1, 2].

В соответствии с теорией сухого внешнего трения, характерного для работы АФМ, изменение коэффициента трения носит случайный характер. В настоящее время аналитический расчет величины коэффициента трения с учетом большинства факторов, оказывающих влияние на него, еще невозможен, и определение интервала изменения коэффициента трения осуществляется преимущественно экспериментальным способом. При реальных условиях эксплуатации АФМ коэффициент трения может превышать значение f_{max}. В работе [3] установлено, что при эксперименте изменение скорости нарастания нагрузки перед срабатыванием муфты приводит к рассеянию коэффициента трения пары "сталь — НСФ-3", имеющего среднее значение 0,36, в интервале 0,1...1,0. В работе [4] вероятность положительного отклонения коэффициента трения от среднего значения принимается равной 300 %. В работе [5] отмечается, что коэффициент трения пары "дуб — сталь" увеличивается более чем в два раза при изменении продолжительности неподвижного контакта от 10 с до 8 ч.

Ранее влияние несоответствия друг другу прогнозируемой и реальной величин изменения коэффициента трения на точность срабатывания АФМ второго поколения с обособленным силовым замыканием не рассматривалось.

Цель работы — оценка точности срабатывания АФМ с обособленным силовым замыканием при повышении максимальной величины коэффициента трения по сравнению с прогнозируемой величиной.

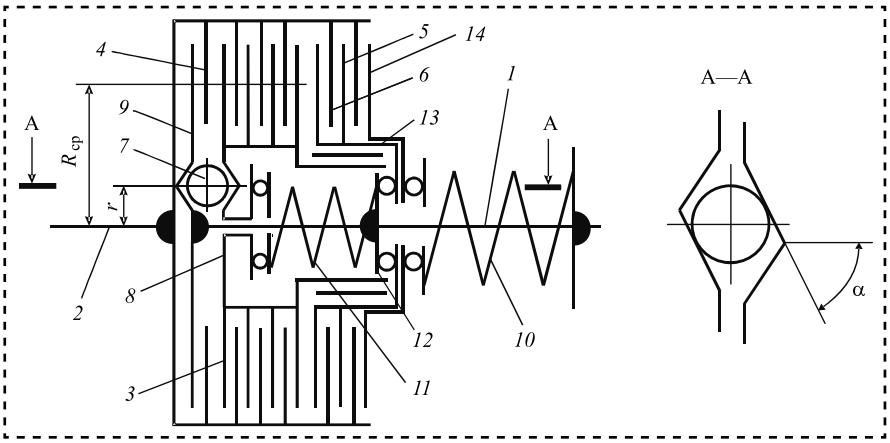


Рис. 1. Принципиальная схема АФМ второго поколения с обособленным силовым замыканием

Объект исследования — АФМ второго поколения с обособленным силовым замыканием представлен на рис. 1 в виде принципиальной схемы [1].

Муфта содержит две соосные одна другой полумуфты *1* и *2*, связанные между собой двумя фрикционными группами:

— основной фрикционной группой (ОФГ), состоящей из пакета дисков трения *3* и *4*;

— дополнительной фрикционной группой (ДФГ), включающей диски трения *5* и *6*.

Управляющее устройство (УУ) выполнено в виде тел качения *7*, которые размещены в скошенных гнездах, расположенных на торцовых поверхностях нажимного диска *8* и упорного диска *9*, жестко закрепленных на полумуфте *1* (сечение А-А).

Силовое замыкание пар трения ДФГ осуществляется пружиной *10* через упорный подшипник (для уменьшения сил трения), замыкание пар трения ОФГ — пружиной *11*, которая слева опирается на упорный подшипник, а справа — на упор *12*, закрепленный на ступице полумуфты *1*.

Для реализации схемы обособленного силового замыкания фрикционных групп в конструкцию введен стакан *13*, который связан со ступицей нажимного диска при помощи шлицевого соединения и опирается слева на упор *12* через упорный подшипник.

Сила давления на пары трения *5* и *6* ДФГ передается от пружины *10* посредством нажимного фланца *14* через упорный подшипник.

Обозначая число пар трения ОФГ, непосредственно связанных с нажимным диском *8*, через z_2, запишем выражения для вращающего момента, распорной силы УУ и ограничения величины КУ:

$$T_п = F_п R_{ср} f \frac{zn + z_1 - z_1 z_2 Cf}{1 + (z - z_2)Cf}; \quad (1)$$

$$F_р = CfF_п \frac{z_1 + (z - z_2)n}{1 + (z - z_2)Cf}; \quad (2)$$

$$C_{пред} \leqslant \frac{n}{z_1 f_{max}}, \quad (3)$$

где $F_п$ — сила натяжения пружины *10*; $R_{ср}$ — средний радиус поверхностей трения ОФГ и ДФГ; f — коэффициент трения; z — общее число пар трения ОФГ; z_1 — число пар трения ДФГ; C — КУ обратной связи; n — коэффициент, $n = F_{п1}/F_п$; $F_{п1}$ — сила натяжения пружины *11*.

Особенностью рассматриваемой АФМ является возможность получения формы нагрузочной характеристики, т.е. зависимости $T_п(f)$, в виде кривой, имеющей точку максимума в интервале $f_{min} \ldots f_{max}$ (где f_{min} — минимальная величина коэффициента трения) с равенством друг другу вращающих моментов, соответствующих граничным значениям данного интервала. При этом муфта обладает наиболее высокой точностью срабатывания [2]. В дальнейшем режим работы АФМ при такой форме нагрузочной характеристики будем называть особым.

Условия получения указанной формы нагрузочной характеристики имеют вид [2]:

$$C = \frac{\sqrt{(m+1)^2 + 4(zn + z_1)(z - z_2)m/(z_1 z_2)} - (m+1)}{2(z - z_2) f_{max}}; \quad (4)$$

$$f_к = \frac{\sqrt{1 + (zn + z_1)(z - z_2)/(z_1 z_2)} - 1}{(z - z_2)C}, \quad (5)$$

где $f_к$ — коэффициент трения, при котором вращающий момент достигает максимума в интервале $f_{min} \ldots f_{max}$.

При расчете АФМ необходимо выполнение условия ограничения КУ, так как оно обеспечивает работу муфты в адаптивном режиме с отрицательной обратной связью. Предель-

ную величину КУ, вычисленную по формуле (3), находят из условия, что распорная сила УУ не должна быть больше силы замыкания пар трения ОФГ:

$$F_р \leqslant F_{п1} = nF_п. \quad (6)$$

Исследование функции $F_р(f)$ при постоянных параметрах (см. формулу (2)) показало, что величина $F_р$ непрерывно возрастает с ростом f. Если величина f становится больше, чем прогнозируемое значение f_{max}, сила $F_р$ может превысить силы замыкания пар трения ОФГ, что приводит к выключению из работы УУ, и вращающий момент передается только парами трения ДФГ, а АФМ в данном случае обладает обычной точностью срабатывания.

Найдем величину коэффициента трения, при которой заканчивается действие отрицательной обратной связи. Для этого решим следующее уравнение:

$$F_р = nF_п. \quad (7)$$

Используя выражение (2) в уравнении (7) и решая его относительно f, находим искомую величину:

$$f_i = \frac{n}{z_1 C}. \quad (8)$$

Таким образом, в зависимости от возможных реальных максимальных величин коэффициента трения, работа АФМ может быть представлена двумя фазами:

первая фаза: работа в адаптивном режиме с отрицательной обратной связью в интервале $f_{min} \dots f_i$;

вторая фаза: работа с выключенной отрицательной обратной связью в интервале $f_i \dots f'_{max}$ (где f'_{max} — реальная максимальная величина коэффициента трения, $f'_{max} > f_{max}$).

Коэффициент точности АФМ вычисляется в обеих фазах работы как отношение максимального вращающего момента к минимальному, в том числе в интервале $f_{min} \dots f'_{max}$. Поскольку вращающий момент в первой фазе найден по формуле (1), необходимо определить вращающий момент муфты во второй фазе.

Значение вращающего момента оценивается пропорционально квадрату величины КУ и кубу величины коэффициента трения в случае, когда происходит осевое перемещение пар трения ДФГ вправо (см. рис. 1), обусловленное перемещением пар трения ОФГ за счет возрастающей распорной силы [6]:

$$T_{пi} = z_1 F_п R_{ср} C^2 \left(f'\right)^3, \quad (9)$$

где f' — коэффициент трения, принадлежащий интервалу $f_i \dots f'_{max}$.

Конструкция АФМ позволяет исключить осевое перемещение пар трения ДФГ. Для этого зазор между левой крайней парой трения ДФГ и правой крайней парой трения ОФГ должен быть достаточно большим, чтобы происходило осевое перемещение пар трения ОФГ. В этом случае вращающий момент пропорционален коэффициенту трения и вычисляется по формуле для предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания:

$$T_{пi} = z_1 F_п R_{ср} f'. \quad (10)$$

Общая картина изменения вращающего момента в зависимости от коэффициента трения в двух фазах работы АФМ схематично показана на рис. 2.

На рис. 2 участки *1*, *2* отражают зависимость $T_п(f)$ в первой фазе работы муфты, а участки *3* и *4* — во второй фазе. В зависимости от существования осевого перемещения пар трения ДФГ график функции $T_п(f)$ может состоять из трех участков — *1*, *2*, *3* или *1*, *2*, *4*:

— участок *1* соответствует форме нагрузочной характеристики АФМ в прогнозируемом интервале $f_{min} \dots f_{max}$, т.е. имеющей точку максимума при $f = f_к$ с равенством друг другу вращающих моментов $T_п(f_{min}) = T_п(f_{max})$;

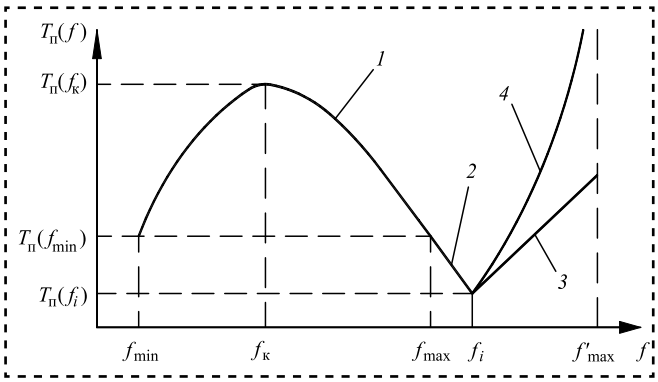


Рис. 2. Графики нагрузочных характеристик АФМ второго поколения с обособленным силовым замыканием

— участок *2* — график функции по формуле (1) в интервале $f_{\max} \dots f_i$, т.е. вне прогнозируемого интервала изменения коэффициента трения. Форма участка *2* объясняется характером функции формулы (1), которая, достигая максимума при $f = f_к$, далее убывает с увеличением f;

— участок *3* — график функции по формуле (10) в интервале $f_i \dots f'_{\max}$ при отсутствии осевого перемещения пар трения ДФГ. В соответствии с характером функции по формуле (10), участок *3* представлен линейной зависимостью;

— участок *4* — график функции формулы (9) в интервале $f_i \dots f'_{\max}$ при перемещении пар трения ДФГ под воздействием пар трения ОФГ. Вращающий момент резко возрастает, так как он пропорционален кубу величины коэффициента трения. Следовательно, максимальное значение вращающего момента на участке *4* значительно больше, чем на участке *3*, а точность срабатывания муфты ниже. Поэтому в дальнейшем не будем принимать во внимание участок *4*, и считаем, что график нагрузочной характеристики АФМ состоит из участков *1*, *2* и *3*, когда конструкция АФМ обеспечивает неподвижность дисков ДФГ во второй фазе ее работы.

Исследуем точность срабатывания АФМ. Исходя из графика на рис. 2, можно записать формулу коэффициента точности муфты $K_т$ в зависимости от повышенной величины максимального коэффициента трения. Поскольку изменение вращающего момента имеет различный характер в каждом интервале значений коэффициента трения, $K_т$ также изменяется по различным законам.

1. Работа муфты в *первой фазе*. Вращающий момент $T_{\max}$ в интервале $f_{\min} \dots f_i$ постоянный и равен расчетному значению, которое соответствует $f_к$, т.е. $T_{\max} = T_п(f_к) = \text{const}$. Зависимость коэффициента точности от коэффициента трения, принадлежащего этому интервалу, имеет вид

$$K_т = \frac{f_к\left(zn + z_1 - z_1 z_2 C f_к\right)\left[1 + \left(z - z_2\right)C f''\right]}{f''\left(zn + z_1 - z_1 z_2 C f''\right)\left[1 + \left(z - z_2\right)C f_к\right]}, \quad (11)$$

где f'' — произвольное значение коэффициента трения, принадлежащее интервалу $f_{\min} \dots f_i$.

Заменяя в формуле (11) f'' на f_i, запишем выражение для максимального коэффициента точности в рассматриваемом интервале:

$$K_т\left(f_i\right) = \frac{f_к\left(zn + z_1 - z_1 z_2 C f_к\right)\left[1 + \left(z - z_2\right)C f_i\right]}{f_i\left(zn + z_1 - z_1 z_2 C f\right)\left[1 + \left(z - z_2\right)C f_к\right]}. \quad (12)$$

2. В интервале $f_i \dots f_{i1}$ муфта работает во *второй фазе*. При увеличении коэффициента трения от f_i до f_{i1} вращающий момент увеличивается соответственно от $T_п(f_i)$ до $T_п(f_{i1})$, но при этом момент $T_п(f_{i1})$ не превышает момент $T_п(f_к)$. В этом интервале коэффициент точности остается неизменным и равен максимальному значению его в предыдущем интервале, определяемому по соотношению (12).

3. В интервале $f_{i1} \dots f'_{\max}$ муфта продолжает работать во *второй фазе*. Вращающий момент в этом интервале увеличивается пропорционально коэффициенту трения, и всегда больше чем момент $T_п(f_к)$. Величина коэффициента точности также пропорциональна коэффициенту трения, принадлежащему этому интервалу

$$K_т = \frac{f'''}{f_i}, \quad (13)$$

где f''' — произвольное значение коэффициента трения, принадлежащее интервалу $f_{i1} \dots f'_{\max}$.

Определим значение f_{i1}, при котором вращающий момент равен максимальному расчетному моменту $T_п(f_к)$. Для этого заменим в формуле (1) f на $f_к$, а в формуле (10) — f' на f_{i1} и приравняем друг другу два полученных выражения:

$$f_{i1} = \frac{f_к\left(zn + z_1 - z_1 z_2 C f_к\right)}{z_1\left[1 + \left(z - z_2\right)C f_к\right]}. \quad (14)$$

При определенных параметрах z, z_1 и z_2 формула (14) отражает зависимость величины f_{i1} от n, C и $f_к$. С другой стороны, величины C и $f_к$ при этих условиях определяются в зависимости от коэффициента n. Поэтому формулу (13) можно считать функцией f_{i1} от n.

Для оценки влияния коэффициента n на величину f_{i1} воспользуемся графическим способом. На рис. 3 показаны графики зависимости $f_{i1}(n)$, построенные по соотношению (14) при $z_1 = 1$ и $z_2 = 2$. Остальные исходные дан-

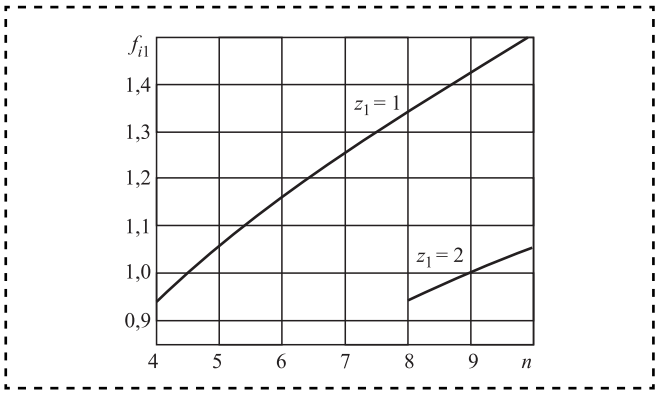


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициента трения от коэффициента *n*

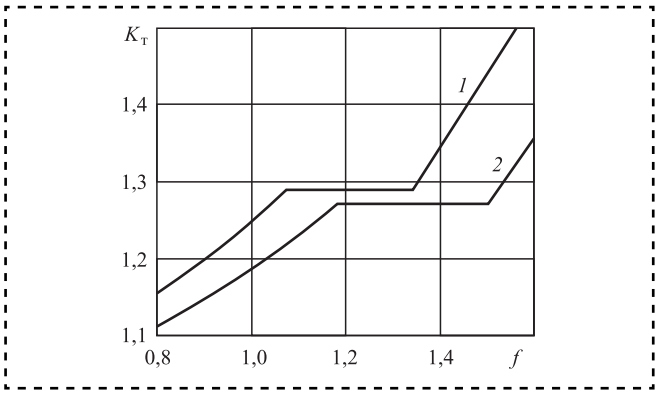


Рис. 4. График зависимости $K_т(f)$

ные: $z = 6$, $z_2 = 2$. Величины C и $f_к$ при определенном значении n вычислены соответственно по формулам (5) и (6).

Анализ графиков показывает:

— коэффициент трения f_{i1} возрастает с увеличением n. Это объясняется тем, что при определенных значениях z, z_1 и z_2 вращающий момент $T_п(f_к)$ увеличивается с ростом n, что также увеличивает вращающий момент $T_п(f_{i1})$, пропорциональный f_{i1}, поскольку указанные моменты должны быть равны друг другу;

— при определенном нижнем граничном значении n с увеличением z_1 коэффициент трения f_{i1} уменьшается. Следовательно, увеличение z_1 приводит к снижению точности срабатывания муфты не только в адаптивном режиме, но и в неадаптивном режиме. Данный вывод имеет практическое значение для рационального выбора z_1 при проектировании.

Для количественной оценки отклонения коэффициента точности от расчетного значения в условиях эксплуатации при увеличении коэффициента трения по отношению к прогнозируемому воспользуемся графическим способом. В интервале $f_{min} ... f_i$ график *1* зависимости $K_т(f)$ на рис. 4 в интервалах $f_i ... f_{i1}$ ($K_т$ = const) построен по формуле (11) и $f_{i1} ... f'_{max}$ — по формуле (13). В качестве исходных данных при построении графиков принято: $z = 6$, $z_1 = 1$; $z_2 = 2$. Кривая *1* построена при $n = 8$, кривая *2* — при $n = 10$. Величины C и $f_к$ при определенном значении n вычислены соответственно по формулам (5) и (6).

Графики на рис. 4 показывают следующее:

— увеличение коэффициента трения в 2 раза по отношению к его максимальному прогнозируемому значению приводит к росту коэффициента точности АФМ в 1,29 раза при $n = 8$ и в 1,22 раза при $n = 10$;

— с увеличением n и КУ участок постоянства коэффициента точности увеличивается, а участок его роста уменьшается, что повышает точность срабатывания муфты.

При эксплуатации АФМ с увеличением максимального коэффициента трения (до двух раз) по отношению к прогнозируемому значению, увеличение коэффициента точности от расчетного составляет ≈25 %. Это отклонение можно снизить путем рационального выбора значений коэффициента n при z_1, равном единице.

Результаты исследования могут быть использованы при оценке эффективности применения АФМ второго поколения с обособленным силовым замыканием в условиях переменного максимального значения коэффициента трения, а также при расчетах и проектировании муфты для определения оптимальной величины КУ.

Выводы

1. Исследована форма нагрузочной характеристики, обеспечивающая наиболее высокую точность срабатывания, АФМ второго поколения с обособленным силовым замыканием при фактическом увеличении максимального коэффициента трения по отношению к его прогнозируемому значению. Показана реальная возможность существования второй фазы работы муфты с выключенной обратной связью. Установлено значение коэффициента трения f_i, при котором происходит переход от первой фазы ко второй.

2. Найден интервал изменения коэффициента трения во второй фазе, внутри которого

точность срабатывания муфты постоянная. Ширина этого интервала зависит от коэффициента n и z_1.

3. При определенных параметрах муфты увеличение коэффициента трения в два раза по отношению к прогнозируемому приводит к увеличению коэффициента точности примерно в 1,25 раза по сравнению с расчетным значением.

4. Для повышения точности срабатывания муфты число пар трения ДФГ должно равняться единице, а значение коэффициента n выбирается возможно большим.

Библиографический список

1. **Шишкарев М.П., Чан Ван Дык.** Синтез адаптивной фрикционной муфты второго поколения с обособленным силовым замыканием // Материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2014. С. 300—306.
2. **Шишкарев М.П., Чан Ван Дык.** Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 9. С. 42—45.
3. **Афанасьев М.К.** Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук, Киев, 1971. 21 с.
4. **Запорожченко Р.М.** О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. 1971. № 1. С. 48—52.
5. **Крагельский И.В., Виноградова И.Э.** Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. 220 с.
6. **Шишкарев М.П.** Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет. Ростов-на-Дону: Изд-во РГАСХМ, 2013. 235 с.

УДК 539.21; УДК 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.

The effect of the technology on the properties of coatings ion-plasma methods is studied. The phenomenon of particle transport without dissipation along the equipotential surfaces with constant energy barrier determined by the shape and structure of the crystal surface in dissipative systems. Implementation of such a movement possible substance of the equipotential surfaces of the layered anisotropic solid body with special isoenergetic levels above the Fermi level and below the conduction band, which is formed corresponding to the energy gap. The existence of similarity between elementary particles at different scales of measurement. That ultra low friction, superconductivity, superfluidity, the growth of coatings in vacuum (under certain conditions and thermoelectricity) are related to the phenomena of mass transfer without dissipation of energy with the elements of similarity.

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.

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

Введение

Покрытия на основе соединений переходных металлов (дихалькогениды, нитриды, карбиды, оксиды), наносимые вакуумными ионно-плазменными методами, дают возможность создания поверхностей с улучшенными свойствами. Разработка модели роста таких покрытий и взаимосвязь с технологией нанесения, объяснение процесса формирования покрытий с заданными свойствами, а также комплексные исследования кристаллической структуры и физико-механических свойств покрытий весьма актуальны. Свойства материала во многом определяются его кристаллической структурой, которая формируется в процессе его получения. Реальные физические явления — электрический ток, процесс трения, потоки жидкости, рост кристаллов в ваккуме — являются неравновесными диссипативными процессами, потоками энергии и вещества вдали от равновесия. Однако в таких неравновесных процессах возможно возникновение стационарных потоков вещества, движущихся без диссипации энергии.

Цель работы — создание возможности движения потоков частиц без рассеяния энергии по определенным эквипотенциальным поверхностям в конденсированной среде, проявляющееся в виде сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, роста кристаллов в вакууме. Для исследований применены теория размерности, принцип суперпозиции и свойство аддитивности системы, теория подобия.

При сборке прецизионных пар сверхнизкое трение позволяет перемещать детали без стоп-эффекта, уменьшить критическую скорость для режима прерывистого (скачкообразного) трения, при сверхмалых перемещениях без вибрации (скачков) [1—9].

Объекты и методы исследований

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

Экспериментальные результаты

Для защиты рабочих поверхностей пар трения от изнашивания разработана технология получения износостойких антифрикционных покрытий переменного по толщине состава с высокими триботехническими свойствами [1—9, 19, 20] преимущественно из коррозионностойких сталей аустенитного класса или титановых сплавов. Из технологических параметров нанесения покрытий наиболее существенным следует считать температуру подложки, потенциал смещения, подаваемый на плату держателя образцов, а также легирование наносимого покрытия с помощью подачи в рабочую камеру реактивного газа (или газовой смеси) и изготовление сменных мишеней сложного состава.

Исследованы покрытия на основе дисульфида молибдена MoS_2 при различной температуре подложки на образцах из компактной керамики Al_2O_3. Установлено, что при изменении температуры подложки происходило формирование покрытий MoS_2 со следующими структурами:

— квазиаморфной (при $T < 383$ К);

— поликристаллической разупорядоченной;

— поликристаллическими текстурированными с преимущественными ориентациями по осям кристаллитов $[10\bar{1}0]$ (при T = 473...573 K и T = 773...923 K) и $[11\bar{2}0]$ (при T = 673...773 K), перпендикулярным поверхности подложки (рис. 1).

Из анализа электронограмм (рис. 1) следует, что размеры кристаллитов вдоль направления [0001] меньше, чем вдоль оси $[10\bar{1}0]$ практически на порядок, о чем свидетельствует размытость соответствующих рефлексов *hkil* (типов $10\bar{1}l$ и $11\bar{2}l$).

При изменении температуры подложки покрытий на основе дихалькогенидов молибдена и вольфрама ($MoSe_2$, WS_2 и WSe_2) также формируются квазиаморфные, поликристаллические или текстурированные покрытия (рис. 1—4). Ориентация кристаллитов вдоль оси $[10\bar{1}0]$, перпендикулярной поверхности подложки, наблюдалась для MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 при температуре 473...973 K, вдоль оси $[11\bar{2}0]$ — для MoS_2 при T = 673...773 K. Все кристаллические покрытия имели структуру гексагонального типа 2H—MoS_2. Фазовый переход от аморфной к кристаллической структуре при нанесении покрытий из дихалькогенидов является нелинейным и происходит в определенном достаточно малом диапазоне температур (см. рис. 4). В основе атомно-кластерной модели роста покрытий лежит возникновение мигрирующей фазы на поверхностях растущего покрытия под воздействием тепловых потоков — от частиц осаждаемого вещества и тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося по поверхностям растущего покрытия [5—9]. Также установлено влияние технологических режимов нанесения на получаемую кристаллическую структуру и свойства ионно-плазменных покрытий. Наиболее высокими триботехническими свойствами обладают покрытия из дихалькогенидов с кристаллической структурой.

Зависимость структуры от расположения образцов на плате держателя. Исследования роста покрытий при расположении образцов в разных областях (в центре и на периферии) платы держателя подложек установили, что при расположении образца в центре платы держателя кристаллиты росли в виде текстуры с осями $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ при соответствующих температурах подложки (см. рис. 1). Ось [0001] полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. При удалении от центра платы к периферии наблюдали плавный наклон осей $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ кристаллитов к центру с одновременной ориентацией оси [0001] по радиус-вектору с началом в центре держателя образцов, причем угол наклона осей достигал 30°. Совпадение направления пучка электронов в колонне электронографа с радиус-вектором, выходящим из центра платы, приводит к возникновению симметричной дифракционной картины, при параллельном перемещении образца в пучке вид дифракционной картины остается неизменным.

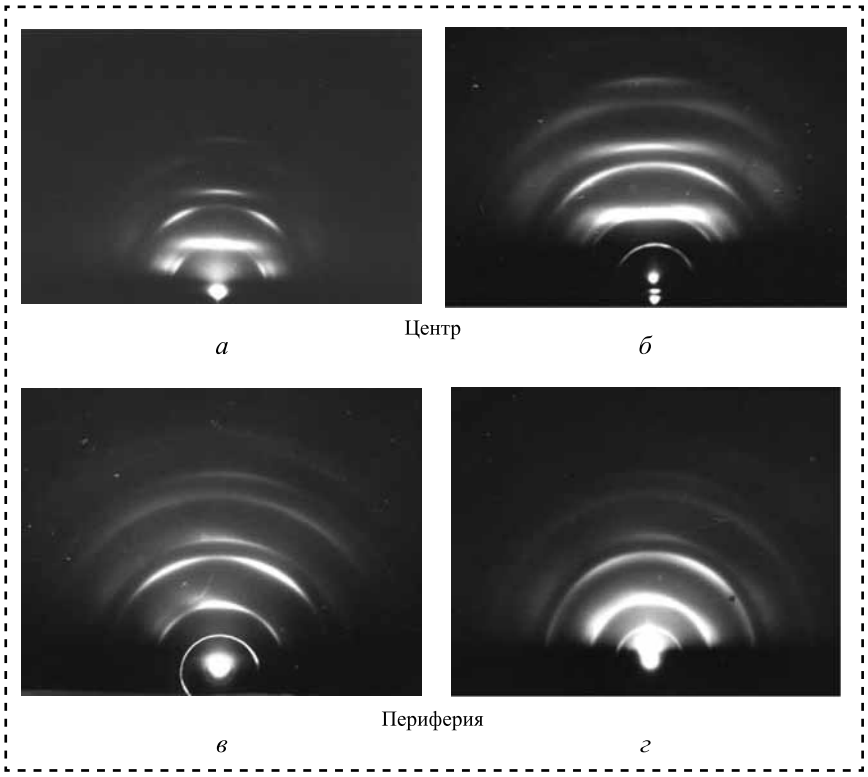


Рис. 1. Электронограммы покрытий MoS_2 (*а, в*) и WSe_2 (*б, г*) толщиной 0,5 мкм, наносимых при температуре 523 K (MoS_2) и 623 K (WSe_2). Расположение образцов в центре платы (*а, в*) и на ее периферии (*б, г*)

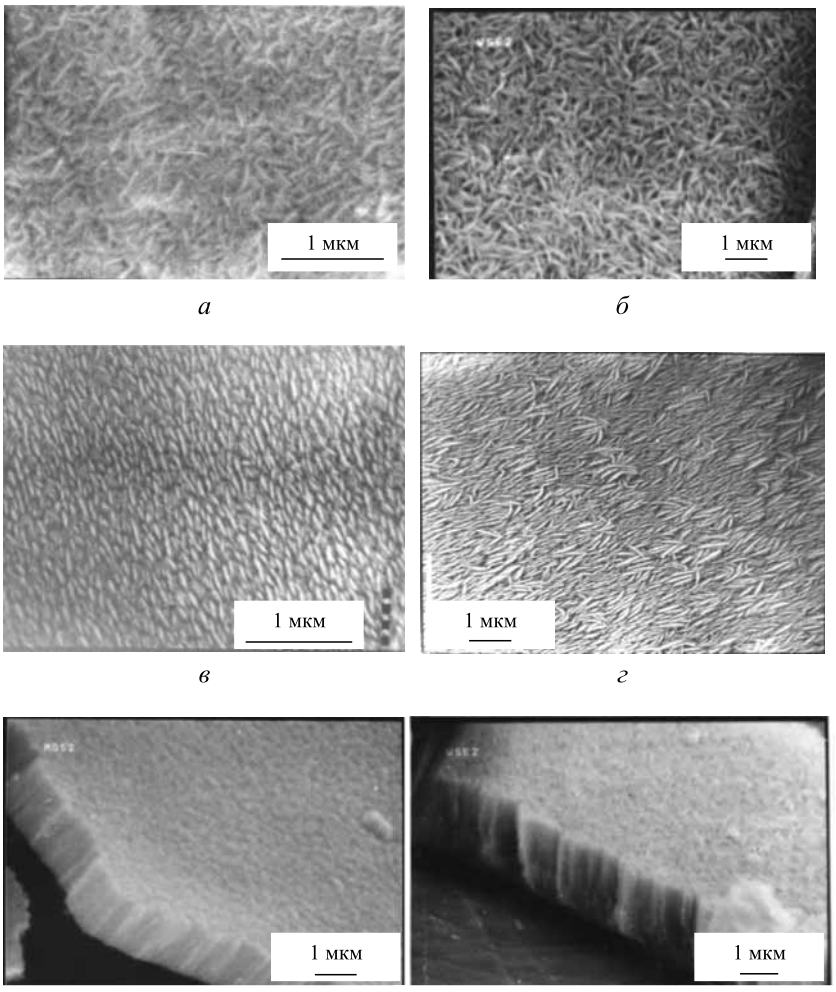


Рис. 2. Поверхность (*а—е*) и скол (*д, е*) покрытий MoS_2 (*а, в, д*), WSe_2 (*б, г, е*), наносимых при температуре 523 К (MoS_2) и 653 К (WSe_2) при расположении образцов в центре платы (*а—г*) и на ее периферии (*д—е*)

Полученные результаты подтверждают исследования морфологии поверхности покрытия (см. рис. 2). Кристаллиты ориентируются с небольшим угловым разбросом. При удалении от центра платы они образуют замкнутые концентрические окружности. Такая морфология пленок сохраняется при нанесении покрытий из разных дихалькогенидов (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) (см. рис. 2—4). Область кристаллизации при одинаковых условиях осаждения (изменяли только температуру подложки) смещалась в зону более высоких температур. Наиболее высокие температуры перехода от аморфной структуры к текстурированной кристаллической наблюдали для диселенида вольфрама WSe_2 (см. рис. 4).

Текстуры с осями $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ в покрытиях на основе дихалькогенидов являются текстурами роста, так как они возникают не на стадии зарождения, а на более поздних стадиях [2—8]. Так, например, в случае нанесения дисульфида молибдена на полированные образцы из стали или Al_2O_3 при температуре 523 К покрытие неоднородно по толщине. Покрытия толщиной менее 0,08 мкм обладают аморфной структурой и имеют ровную поверхность. При фрикционных испытаниях такие покрытия не проявляли антифрикционного действия, как и в случае нанесения покрытий при низких температурах подложки. Покрытия, полученные при указанных условиях и толщиной более 0,1 мкм, имели хорошие антифрикционные свойства.

Растущая структура покрытий имеет вид характерных дендритных фракталов с гребнеобразной формой. Однако при определенных условиях на необработанных поверхностях подложек возникает более развитая дендритная структура в виде броуновского дерева (см. рис. 3). Фрак-

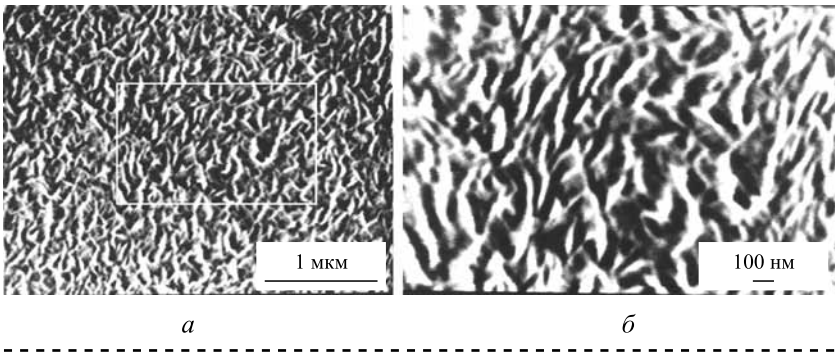


Рис. 3. Покрытие MoS_2:
а — ×20 000; *б* — ×50 000

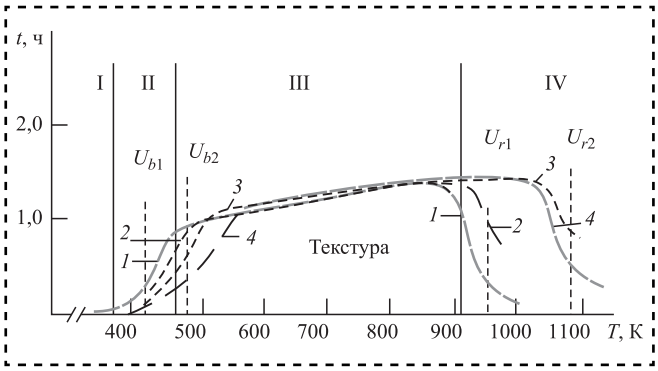


Рис. 4. Зависимость долговечности покрытий на основе дихалькогенидов на образцах из Al_2O_3 от температуры подложки при триботехнических испытаниях по схеме "диск—сфера":
1 — MoS_2; *2* — $MoSe_2$; *3* — WS_2; *4* — WSe_2; I — аморфная структура; II — поликристалл; III — текстура; IV — область разложения дихалькогенида MX_2 на металл и халькоген; $U_{b1,2}$ — потенциальный барьер поверхности MoS_2 и WSe_2; $U_{r1,2}$ — энергии разложения дихалькогенидов MoS_2 и WSe_2

тальные структуры образуются как результат броуновского движения частиц на поверхности и возникновения фронта кристаллизации древовидного фрактала из осаждаемого потока частиц [2, 3]. В результате конкурентного отбора преимущественный рост получают кристаллографические плоскости с индексами $[10\bar{1}0]$, имеющие наиболее высокую поверхностную энергию. При этом оппозитные плоскости (0001) растущих кристаллов, где действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают непрерывный приток мигрирующих атомов с минимумом диссипации в область кристаллизации.

Область кристаллизации дихалькогенидов при одинаковых условиях осаждения (изменялась только температура подложки) смещалась в зону более высоких температур. Наиболее высокие температуры перехода от аморфной структуры к текстурированной кристаллической наблюдали для диселенида вольфрама WSe_2 [2—9].

Рост температуры подложки выше температуры нелинейного фазового перехода от аморфной структуры к кристаллической (см. рис. 4) приводит к линейному росту размера кристаллов в покрытиях при сохранении дендритного строения поверхности всех дихалькогенидов. Это также свидетельствует о существовании подобия структуры на разных шкалах измерения.

При фрикционных испытаниях покрытия с аморфной структурой не проявляли антифрикционного действия, в то время как покрытия с кристаллической структурой имели достаточно высокие триботехнические характеристики. Антифрикционные свойства кристаллических покрытий с ростом размера кристаллитов пропорционально повышались (см. рис. 3). В этих экспериментах меняли только температуру подложки.

Простое механическое увеличение микрофотографии, полученной на электронном микроскопе при увеличении ×2000, не приводит к возникновению новых деталей снимка. Однако увеличение масштабирования микрофотографии в 2,5 раза (до ×5000) с изменением режимов электронного микроскопа приводит к возникновению новых деталей изображения на микрофотографии (см. рис. 3), которые ранее не были видны, при этом сохраняется подобная дендритная структура покрытия.

При получении кристаллических покрытий наблюдали элементы подобия в строении поверхностей в случае нанесения покрытий дихалькогенидов переходных металлов при различных температурах подложки. Также изменение масштабирования (увеличения) приводило к сохранению элементов подобия поверхности покрытий. Критерием подобия в этих покрытиях следует считать отношение длины кристаллита (вдоль направления $[10\bar{1}0]$) к его ширине (размеры вдоль направления [0001]). Отношение длины кристаллита к ширине составило практически порядок. С ростом размера кристаллитов критерий подобия (отношение размеров) сохраняется.

Установлено, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия на основе кристаллических дихалькогенидов. Дальнейшее увеличение триботехнических свойств покрытий возможно с помощью изменения кристаллической структуры посредством технологии нанесения и создания легированных многослойных покрытий с износостойким подслоем [2—9]. Например, увеличение твердости подложки приводит к снижению коэффициента трения и росту долговечности покрытий на основе дихалькогенидов, что объясняется легкостью раскалывания кристаллитов и формированием

преимущественной ориентации оси [0001] перпендикулярно поверхности в процессе трения, обеспечивающей легкость скольжения кристаллитов друг относительно друга. Также триботехнические и физико-механические характеристики улучшаются при легировании дисульфида молибдена.

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

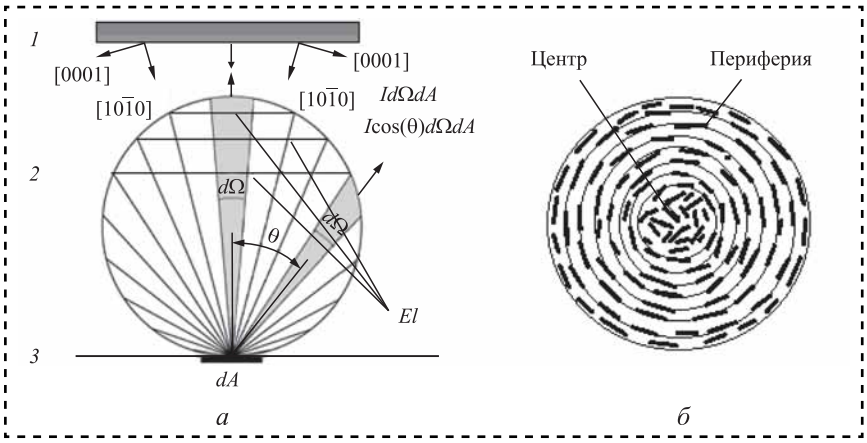


Рис. 5. Рост кристаллов покрытий при вакуумном ионно-плазменном распылении по закону Ламберта (косинуса):

а — схема нанесения; *б* — вид снизу поверхности покрытия с пластинками металл—халькоген; *El* — линии равной плотности потока распыленного вещества; *1* — плата с образцами и растущим на них покрытии; *2* — распределение распыленного вещества по закону косинуса; *3* — распыляемая мишень

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

Полученные результаты свидетельствуют о возникновении подобия на разных шкалах измерения покрытий на основе дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2), а также подобие покрытий на основе оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, наносимых ионным распылением в вакууме [2—9]. Подобие структуры покрытий заключается в формировании текстур с двумя осями, как показано на рис. 5.

Легированные покрытия из дисульфида молибдена состава MoS_2D_x по внешнему виду практически не отличались от обычных покрытий MoS_2. В качестве легирующего вещества D могут быть выбраны элементы или соединения, не образующие сильных (химических) связей с основной решеткой MoS_2. При фрикционных испытаниях по схеме "диск—сфера" покрытий с кристаллической структурой гексагонального дисульфида молибдена 2H—MoS_2 получены низкие значения коэффициента трения, но в целом соответствующие трению природного дисульфида молибдена. Однако фрикционные испытания в тех же условиях покрытий состава MoS_2D_x привели к получению необычно низких значений коэффициента трения (эффект сверхнизкого трения) (рис. 6).

Электронографические исследования покрытий MoS_2D_x показали, что в них произошло значительное увеличение периода решетки вдоль оси *c* (до 1,38...1,43 нм) против 1,2295 нм для соединений со стехиометрическим составом (гексагональный 2H—MoS_2) при практически неизменном периоде вдоль оси *a*. Увеличение растояния между слоями при размещении атомов D в межпакетных пространствах в силу того, что

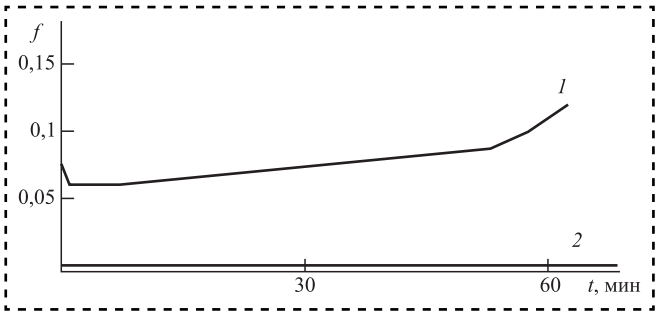


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от длительности испытаний легированных покрытий:
1 — MoS_2; *2* — MoS_2D_x

энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия меняется пропорционально r^{-6}, должно приводить к уменьшению этого взаимодействия практически на порядок. В соответствующих условиях возможна реализация движения таких атомов без диссипации в виде эффекта сверхнизкого трения. Нанесение легированных многослойных покрытий приводит к возможности получения сверхнизкого трения при нормальных условиях на воздухе и к возрастанию долговечности покрытия в несколько раз.

Обсуждение результатов исследований

Рассмотрено понятие подобия между явлениями [16—18], а также причины возникновения элементов подобия между частицами и взаимосвязь с движением потока частиц без диссипации энергии. Определяющей наличие подобия величиной является критерий подобия. Это безразмерная величина, составленная из размерных физических параметров, определяющих рассматриваемое физическое явление. Равенство всех однотипных критериев подобия для двух физических явлений и систем — необходимое и достаточное условие их физического подобия. Установлены закономерности формирования систем частиц в упорядоченном состоянии из исходного хаотического состояния, причем обнаружена возможность создания в полученных системах без диссипативных потоков вещества. Исследована взаимосвязь термодинамических параметров системы (конденсированного состояния вещества) с квантово-механическими свойствами подсистемы (частицы вещества). В основе рассуждений лежат теория подобия, принцип суперпозиции и свойство аддитивности, теория размерности [16—18]. Использованы теорема Л. Онсагера, а также флуктуационно-диссипационная теорема, которая связывает флуктуации системы (их спектральную плотность) с динамическими и диссипативными свойствами [10, 11].

Возникновение подобия явлений

Обнаружены явления переноса частиц в виде потоков без диссипации энергии в неравновесных диссипативных системах [2—6, 9] вдоль поверхностей с достаточно малыми и постоянными по величине потенциальными барьерами, к которым относятся сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть. Показано, что сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост покрытий в вакууме (при определенных условиях и термоэлектричество) являются подобными явлениями переноса вещества. Определены критерии подобия этих физических явлений.

Между ультранизким (*ultra-low*) трением и сверхнизким (*super-low)* трением существует отличие:

— *ультранизкое трение (ultra-low friction)* возникает в случае создания на атомно-гладких поверхностях трения монослоев двумерного газа, обеспечивающих эффект газовой смазки;

— *сверхнизкое трение (super-low friction)* имеет квантовую природу и возникает при движении потоков частиц по эквипотенциальным поверхностям слоистого твердого тела с изоэнергетическими уровнями, что обеспечивает движение без диссипации энергии при отсутствии сил сопротивления перемещению. Сверхнизкое трение было реализовано при нормальных условиях на воздухе [1—9].

Сверхнизкое трение возникает при наличии в зоне трения атомно-гладких ван-дер-ваальсовых плоскостей (0001) с одинаковыми по величине и достаточно малыми потенциальными барьерами, меньше тепловой энергии частиц. Такие поверхности имеют постоянное значение поверхностной энергии (либо потенциального поля поверхности) и являются изоэнергетическими (либо эквипотенциальными) поверхностями [2—9]. Атомно-гладкие плоскости (0001) дихалькогенидов являются поверхностями с ван-дер-ваальсовой энергией взаимодействия между слоями атомов халько-

гена. Выше энергии эквипотенцильной поверхности возникает энергетическая щель. Потоки частиц вдоль такой щели над эквипотенциальными поверхностями (0001) могут двигаться в отсутствие сил сопротивления без рассеяния энергии (рис. 6, кривая *2* и рис. 7, *а*).

Коэффициент подобия $K_{пс}$ определяется через коэффициент скольжения $K_с$ [2] и зависит от соотношения количеств двух фаз — конденсированной $B_с$ и мигрирующей $C_{снт}$:

$$K_с = A_в[(1 - \varepsilon_м)B_с + \varepsilon_м C_{снт}]^{1/2}, \qquad (1)$$

где $A_в$ — параметр, зависящий от свойств вещества; $\varepsilon_м = D\int_{U_b}^{U_r}\left(\frac{dN}{d\,\mathrm{v}}\right)dT$ — число частиц с энергией, превышающей потенциальный барьер поверхности U_b; D — коэффициент пропорциональности; U_r — энергия связи частицы с поверхностью.

Частицы на поверхности с энергией $U_b < E < U_r$ подчиняются максвелловскому распределению по скоростям $\frac{dN}{d\,\mathrm{v}}$. Переменные параметры $B_с$ и $C_{снт}$ определяют состояние единичных частиц в зависимости от тепловой энергии, в то время как состояние частиц всей фазы определяет параметр $\varepsilon_м$. В предельном случае остается только мигрирующая бездиссипативная фаза и реализуется феномен сверхнизкого трения [2]

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

Тогда коэффициент подобия в случае сверхнизкого трения

$$K_{пс} = n_{снт}K_с,$$

где $n_{снт}$ — коэффициент пропорциональности для сверхнизкого трения.

Сверхпроводимость проявляется при возможности возникновения и существования пар Купера и их тепловой энергии выше потенциального барьера поверхности Ферми, что создает возможность

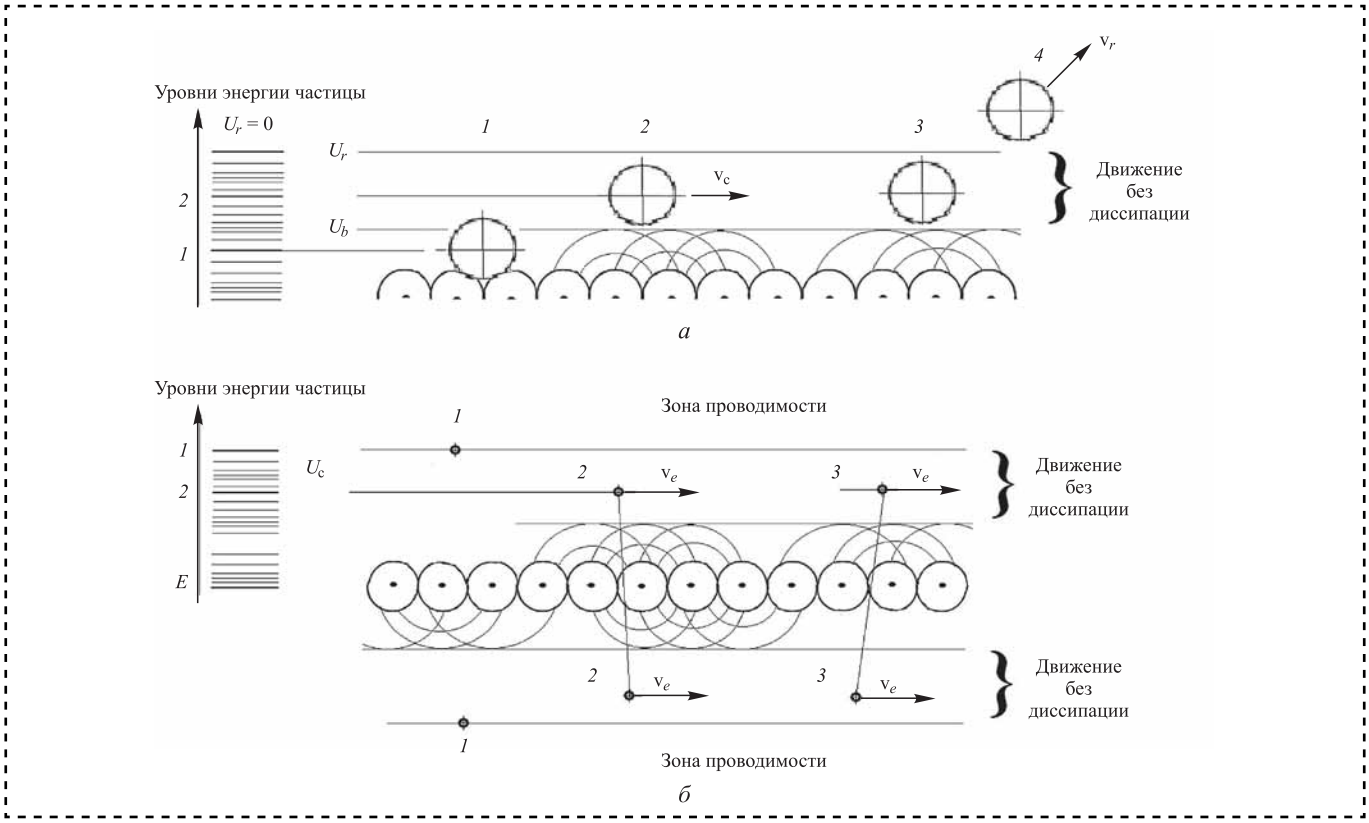


Рис. 7. Перемещение частиц вещества без диссипации энергии по эквипотенциальным поверхностям выше критического уровня энергии (в момент перескока из положения *1* в положение *3* атом находится в состоянии движения без рассеяния энергии):

а — атома (молекулы) по сингулярной плоскости (0001) дихалькогенида — при повышении тепловой энергии; *б* — электрона куперовской пары с уровня Ферми в нижний уровень зоны проводимости, в случае образования куперовской пары электрон находится в состоянии сверхпроводимости — при охлаждении

движения по поверхности Ферми без диссипации энергии при соответствующих температурах. Такое движение осуществляется при образовании над поверхностью Ферми ниже зоны проводимости энергетической щели, вдоль которой осуществляется бездиссипативное перемещение частиц (рис. 7, *б*). Коэффициент подобия для сверхпроводимости $K_{\text{псп}}$ определяется через коэффициент электрического сопротивления вещества $K_{\text{сп}}$ [2]. В случае сверхпроводимости происходит фазовый переход нормальных электронов в бозе-конденсат сверхпроводящей фазы куперовских пар:

$$K_{\text{сп}} = A_{\text{в}}[(1 - \varepsilon_f)B_{\text{сп}} + \varepsilon_f C_{\text{п}}]^{1/2}, \quad (3)$$

где ε_f — коэффициент распределения частиц по энергии Ферми—Дирака; $B_{\text{сп}}$ — число частиц сверхпроводящей фазы Бозе; $C_{\text{п}}$ — число частиц нормальной проводящей электронной фазы (электронный газ); $K_{\text{сп}}$ — электрическое сопротивление исследуемого вещества, растущее соответственно с ростом температуры T.

Для коэффициента распределения частиц по энергии ε в случае сверхнизкого трения необходимо использовать распределение Максвелла, в случае сверхтекучести и сверхпроводимости используются статистики Ферми—Дирака и Бозе—Эйнштейна (с соответствующими распределениями частиц по энергии).

Переменные параметры $B_{\text{сп}}$ и $C_{\text{п}}$ относятся к единичным частицам, а состояние всей фазы определяет параметр ε_f. В предельном случае остается только сверхпроводящая бездиссипативная фаза и реализуется феномен сверхпроводимости [2]:

$$K_{\text{с}} = A_{\text{в}}(1 - \varepsilon_f)B_{\text{сп}}{}^{1/2}. \quad (4)$$

Тогда коэффициент подобия

$$K_{\text{сп}} = n_{\text{сп}}K_{\text{с}},$$

где $n_{\text{сп}}$ — коэффициент пропорциональности в случае сверхпроводимости.

Сверхтекучесть — возникновение сверхтекучего состояния рассматривается как фазовый переход II рода жидкого гелия ^{4}He и ^{3}He в сверхтекучее состояние He II (Бозе-конденсация). Свойства исследуемого вещества зависят от количественного соотношения двух фаз. Тогда уравнение (1) можно рассматривать как соотношение двух фаз в двухжидкостной гидродинамике Ландау:

$$K_{\text{ст}} = k_{\text{ст}}L_{\text{ст}} = k_{\text{ст}}A_{\text{в}}[(1 - \varepsilon_b)B_{\text{HeII}} + \varepsilon_b C_{\text{He}}]^{1/2}, \quad (5)$$

где ε_b — коэффициент распределения частиц по энергии Бозе—Эйнштейна; B_{HeII} — число частиц Бозе-конденсата; C_{He} — число частиц нормального жидкого ^{4}He и ^{3}He; A — величина, зависящая от структуры и свойств наносимого вещества; $K_{\text{ст}}$ — относительная величина сил сопротивления перемещению частиц жидкости.

Переменные параметры C_{He} и B_{HeII} относятся к единичным частицам, а состояние всей фазы определяет параметр ε_b. В предельном случае остается только сверхтекучей бездиссипативная фаза и реализуется феномен сверхтекучести [2]

$$K_{\text{ст}} = A_{\text{в}}(1 - \varepsilon_f)B_{\text{сп}}{}^{1/2}. \quad (6)$$

Тогда коэффициент подобия $K_{\text{пст}} = n_{\text{ст}}K_{\text{ст}}$, где $n_{\text{ст}}$ — коэффициент пропорциональности в случае сверхтекучести.

Возникновение новых уровней энергии, запрещенных для частиц в обычном состоянии, показано на рис. 7. Например, электрон с нижнего уровня зоны проводимости в обычных условиях при охлаждении переходит на уровень Ферми, однако при образовании куперовской пары формируется новый разрешенный уровень (см. рис. 7, *б*).

Рост кристаллов в вакууме. В основе атомно-кластерной модели (АКМ) роста покрытий в вакууме лежит воздействие тепловых потоков — от частиц осаждаемого вещества и тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося преимущественно по эквипотенциальным поверхностям растущего покрытия [1—9]. Анизотропное кристаллическое строение применяемых в качестве покрытий соединений дает возможность с помощью потока тепла обеспечить миграцию осаждаемого вещества вдоль сингулярных плоскостей (0001) и рост кристаллической структуры с двумя осями текстуры в виде мозаичного монокристалла (см. рис. 5).

АКМ связана с наличием на поверхности растущего покрытия двух фаз атомов (конденсированной B_a и мигрирующей C_c), нелинейными фазовыми переходами в наносимых слоях растущего покрытия [2—9]. Потоки тепла определяют количество мигрирующей фазы, которая отвечает за размер кристаллитов осаждаемого покрытия (рис. 8). Модель роста позволяет объяснить возникновение фазового перехода типа кристаллизации в диапазоне температур

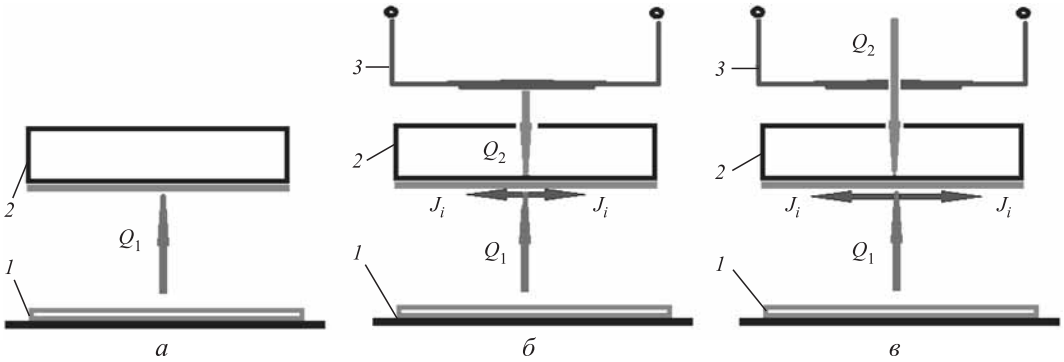


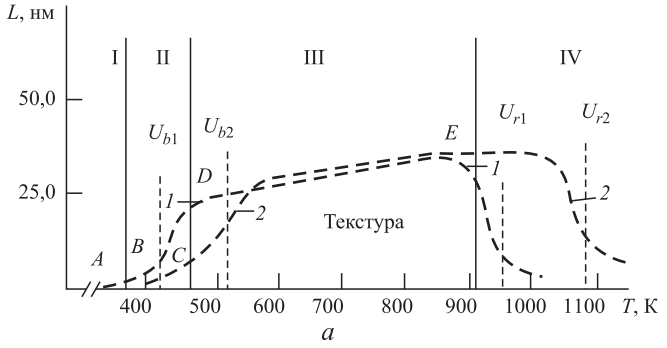
Рис. 8. Направление потоков в вакуумной камере установки при нанесении покрытия:
а — нанесение с охлаждением без применения нагревателя; *б* — область фазового перехода от аморфной структуры к кристаллической (точка перегиба нелинейной кривой кристаллизации); *в* — кристаллическая структура; Q_1 — тепловой поток от осаждаемого вещества; Q_2 — тепловой поток от нагревателя; J_i — поток мигрирующих по поверхности атомов

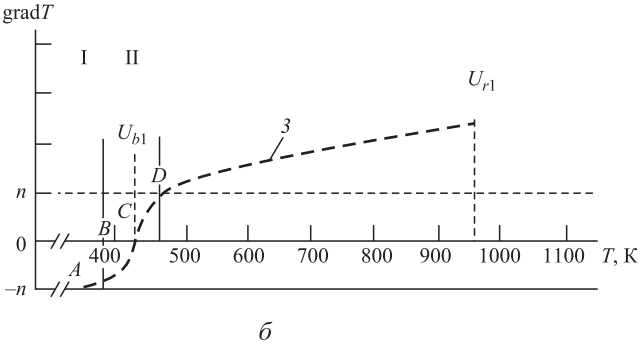
с формированием крупнокристаллического строения покрытий:

$$L_n = A_в[(1 - \varepsilon_м)B_а + \varepsilon_м C_с]^{1/2}, \qquad (7)$$

где $B_а$ и $C_с$ — конденсированная и мигрирующая фазы атомов, соотношением количества которых выражается соотношение двух потоков вещества — скорость миграции и скорость роста монослоя; $A_в$ — параметр, зависящий от свойств наносимого вещества.

Размер растущих кристаллов покрытия определяется фазовым переходом при критической величине характерного параметра (преодоление энергетического потенциального барьера). Соотношение двух фаз является критерием роста аморфной или кристаллической структуры наносимого покрытия. После нанесения таких покрытий и проведения триботехнических исследований установлено, что покрытия с аморфной структурой не проявляли антифрикционных свойств, в то время как покрытия с кристаллической структурой имели достаточно высокие триботехнические характеристики. На рис. 9 показана взаимосвязь размера кристаллов в наносимом покрытии, градиента температуры и распределения частиц по энер-





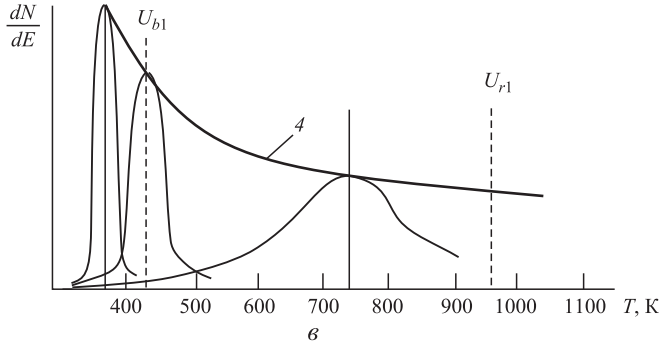


Рис. 9. Зависимость размера кристаллов (*а*), градиента температуры (*б*) и распределения частиц по энергиям (*в*) от температуры:
1, *2* — *L* для соединений MX_2 (M — металл; X — халькоген (1 или 2)); *3* — кривая изменения градиента температуры; *4* — огибающая точек перегиба кривых распределения по энергиям частиц MX_2 (1 или 2); $U_{b1,2}$ — потенциальный барьер поверхности MX_2 (1 или 2); $U_{r1,2}$ — энергия связи MX_2 (1 или 2); *A* — точка роста поликристаллической фазы; *B* — точка условного начала фазового перехода; *C* — точка перегиба функции; *D* — точка начала роста текстурированного покрытия; *E* — точка начала разложения покрытия на металл и халькоген

гиям от температуры подложки. Исследования представлены для двух дихалькогенидов MoS_2 и WSe_2.

Термоэлектричество — это совокупность явлений, в которых разница температур формирует электрический потенциал, или электрический потенциал создает разницу температур. Потоки тепла создают перекрестные потоки частиц, и потоки частиц создают перекрестные потоки тепла.

Уравнения (1), (3), (5), (7) для системы двух фаз (потоков) могут быть представлены в виде определения количественного фазового соотношения:

$$K_n = A_в[(1 - \varepsilon_i)B_j + \varepsilon_i C_с]^{1/2}, \qquad (8)$$

где ε_i — коэффициент распределения частиц по энергии; B_j — поток фазы I; $C_с$ — поток фазы II; K_T — соотношение потоков фазы I и фазы II в зависимости от температуры T.

Потоки тепла определяют количество мигрирующей фазы, с ростом температуры увеличивается число мигрирующих частиц. В предельном случае, когда количество мигрирующей (сверхпроводящей или сверхтекучей) фазы становится практически 100%-ным, возникает сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть. С помощью разработки соответствующей технологии создания потоков тепла можно регулировать количественное соотношение двух фаз при заданных условиях.

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. V. 3. N 2. P. 73—90.
6. **Nozhenkov M.V.** Superlow interaction in layered structures // Global Journal of Researches In Engineering. 2014. V. 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.

(Окончание следует)

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 04.03.2016. Подписано в печать 27.04.2016. 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.