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 ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.00 – МЕХАНИКА, 05.02.00 – МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ, 05.04.00 – ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, 05.05.00 – ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

2019 Том 20 **3 (224)**

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Боброва Ю.С., **Абрамов А.А.**, **Лаухин А.М.**, **Чернобровкин Д.С.** Технология изготовления полугибких печатных плат 99

Ревонченкова И.Ф. Проектирование и применение речевого интерфейса в управлении роботом сборки в машиностроении 106

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Есаулов В.В., Бородулин Д.С., Картусов С.Н., Рожко Т.Е., Юдин Ю.Ю., Колосков А.В., Полторакин А.В., Шашков А.Ю. Исследование возможности герметизации интегрально-оптической схемы герметиком ВГО-1 120

Мищенко К.С., Захарченко М.Ю. Исследование способа формирования локальных дорожек качения шариковой раскаткой с обеспечением повышенной статической грузоподъемности 127

Трение и смазка в машинах и механизмах

Эрлих Б.М. Методика активного возбуждения колебаний с характеристиками сложного типа в машинах и механизмах 131

Меделяев И.А., **Спирягин В.В., Кончаков Н.И., Кобзев И.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния медных труб при их развальцовке в отверстия трубных решеток теплообменных аппаратов и воздействии эксплуатационных нагрузок 137

Информация

Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Зеленская М.Н. XII Международная научно-техническая конференция "Трибология — машиностроению", посвященная 80-летию ИМАШ РАН 141

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

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

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2019

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 BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.00 — MECHANIC, 05.02.00 — MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE, 05.04.00 — POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING, 05.05.00 — TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MECHANICAL ENGINEERING

2019 Vol. 20 **3 (224)**

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Bobrova Yu.S., Abramov A.A., Laukhin A.M., Chernobrovkin D.S. Semi-flex-rigid printed circuit boards technologies 99

Revonchenkova I.F. Design and application of the speech interface in the assembly robot control in engineering 106

Quality assurance. Testing. Monitoring

Esaulov V.V., Borodulin D.S., Kartusov S.N., Rozhko T.E., Yudin Yu.Yu., Koloskov A.V., Poltorakin A.V., Shashkov A.Yu. Investigation of the possibility of sealing the electron-optical circuit sealant VGO-1 120

Mishchenko K.S., Zaharchenko M.Yu. Investigation of forming method local roads of rolling balls with a roller with support of increased static load capacity . . . 127

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Erlich B.M. The methodology of active excitation of oscillations with characteristics of a complex type in machines and mechanisms 131

Medeljaev I.A., Spiryagin V.V., Konchakov N.I., Kobzev I.V. Investigation of the stress-strain state of copper pipes when they are expanding in the holes of tube sheets of heat exchangers and the effect of operational loads 137

Information

Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Zelenskaya M.N. The XII International scientific and technical conference "Tribology — to Mechanical Enginiring", dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS 141

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

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
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

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

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

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

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2019

УДК 621.3.049.75

Ю.С. Боброва, А.А. Абрамов, А.М. Лаухин, Д.С. Чернобровкин
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
E-mail: ju.s.bobrova@bmstu.ru

Технология изготовления полугибких печатных плат

Приведены результаты апробации технологии производства полугибких печатных плат, предназначенных для обеспечения сложной пространственной ориентации печатных узлов на их основе при установке в корпус. Технология предполагает локальное утонение диэлектрика жесткой части над припрессованным к ней тонким стеклотекстолитом FR4, выступающим в роли "гибкой" части. Отличительная особенность предлагаемой технологии — реализация на оборудовании, традиционно предназначенном для изготовления многослойных печатных плат. Даны рекомендации по выбору стеклотекстолитов и полимерных композиций для повышения надежности полугибких плат, обоснованы параметры их конструкций.

The results of approbation of the budgetary technology of production of semi-flexible printed circuit boards are presented. They are intended for providing a complex spatial orientation of printed board assembly on their basis when installed in an enclosure. The technology assumes a local thinning of the dielectric of the rigid part over a thin FR4 laminate pressed into it, acting as a "flexible" part. A distinctive feature of the proposed technology is the possibility of its implementation on the equipment traditionally designed for the manufacture of multi-layer printed circuit boards. The recommendations are given on the choice of FR4 laminates and polymer compositions to improve the reliability of semi-flexible boards, and the parameters of their design are founded.

Ключевые слова: полугибкая печатная плата, стеклотекстолит, фрезерование на заданную глубину, паяльная маска для гибких плат.

Keywords: semi-flex-rigid printed circuit board, FR4, milling selected depth, flex soldermask.

Введение

Стационарная аппаратура и приборы бытового назначения часто предполагают расположение функциональных поверхностей печатных узлов в нескольких плоскостях для их компактного размещения в корпусах относительно сложной пространственной ориентации. При этом способность гибкой части платы такого узла выдерживать динамические нагрузки не требуется, поскольку гибкая часть нагружается только в процессе сборки (или демонтажа для ремонта).

Технология изготовления гибко-жестких печатных плат с гибкой частью на основе полиимида достаточно сложна и дорогостоящa [1, 2]. До сих пор остается открытым вопрос получения надежной металлизации в отверстиях жесткой части платы (отношение диаметра к толщине более 1:4) по ряду причин, имеющих в своей основе физико-химические свойства взаимодействующих конструкционных материалов (полиимид, акрил и т.п.) и растворов, применяемых при металлизации диэлектриков.

Используемые при создании токопроводящего слоя системы химической и прямой металлизации способны вызывать такие негативные явления, как гидролиз полиимида и акриловых адгезивов [1]. Переход на безадгезивный полиимид и прессование жесткой части платы с использованием препрегов на основе эпоксидной смолы не позволяют выстроить стабильный технологический процесс, поскольку снижение температуры щелочных растворов и времени обработки в них для предотвращения гидролиза полиимида сказывается на итоговой толщине палладиевой пленки, ее электро-

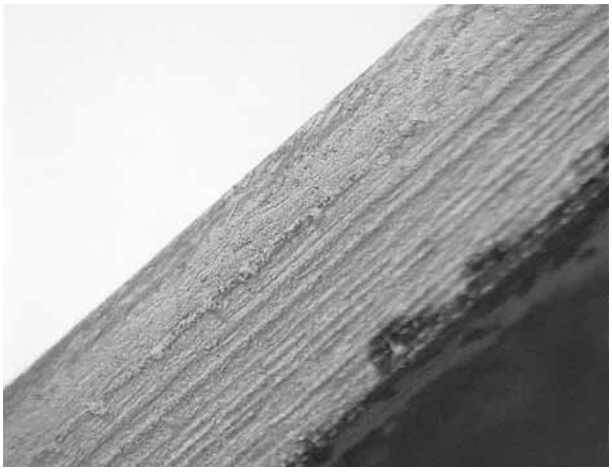


Рис. 1. Дефекты металлизации торца заготовки гибко-жесткой платы [3]

проводности и, как следствие, на толщине и равномерности электролитического слоя меди в отверстии.

На рис. 1 показан результат гальванической металлизации гибко-жесткой печатной платы после прямой активации в совмещенном коллоидном растворе на основе хлористых солей олова и палладия. Обработка в растворах кондиционирования (pH ⩾ 9, в течение 7 мин при 50 °С) и стабилизации (pH ⩾ 12, в течение 4 мин при 42 °С) приводит к тому, что на границе безадгезивного полиимида и препрега на основе эпоксидной смолы по всему периметру нарушена сплошность металлизации.

Если вопрос негативного влияния кондиционирования (очистки отверстий и поверхности от органических загрязнений, а также устранения статического заряда на диэлектрической поверхности) решается применением относительно нового для производства печатных плат процесса плазменной обработки [4], то процесс стабилизации на данном этапе остается неотъемлемой частью прямой активации, например, в совмещенном коллоидном растворе на основе хлористых солей олова и палладия.

Решение столь серьезных технологических задач и приобретение дополнительных единиц оборудования делают технологию изготовления гибких и гибко-жестких печатных плат почти недоступной для мелко- и среднесерийного производства и нерентабельной для массового изготовления электроники, платы которой не используются в условиях постоянных динамических нагрузок.

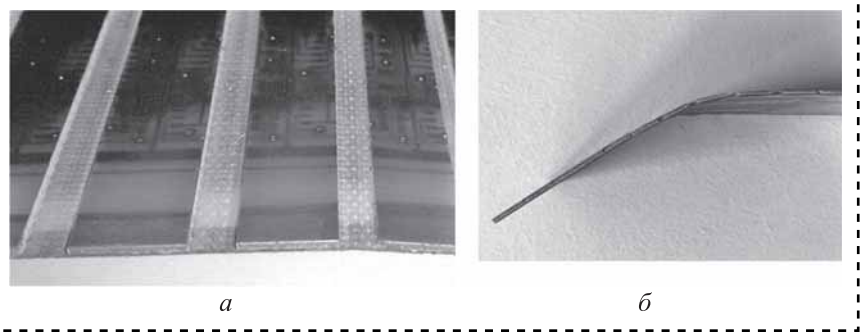
Альтернативой классическим гибко-жестким печатным платам могут быть полугибкие платы [5], полученные на типовом оборудовании для производства многослойных печатных плат из фольгированных стеклотекстолитов и препрегов на основе эпоксидных смол.

Полугибкие печатные платы

При прототипировании полугибкие платы получают локальным утонением базового материала основания до толщины, при которой "гибкая" часть платы будет без разрушения и остаточных деформаций изгибаться на требуемый угол.

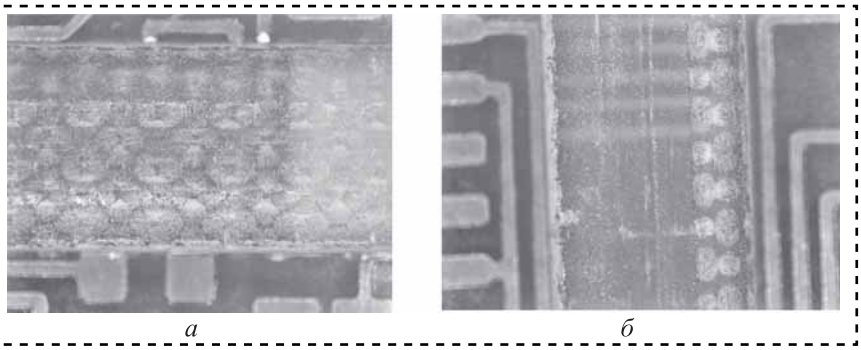
В данном случае существует зависимость гибкости от толщины утоненной части стеклотекстолита и ширины реза. В ходе эксперимента двухстороннюю печатную плату, выполненную из стеклотекстолита FR4 18/18-1,5, фрезеровали на заданную глубину при варьировании ширины реза (рис. 2, *а*). Гибкость исследовали путем изгибания платы в местах утонения на угол от 5 до 90° (рис. 2, *б*) и на "гибкой" части выявляли отслоения и трещины.

Наибольшая гибкость получена при толщинах утоненной части 0,15...0,20 мм и ширинах паза более 3,0 мм с углом изгиба, близким к 60°. При увеличении толщины "гибкой" части на 0,1 мм при той же ширине реза угол изгиба составлял не более 15°. Наиболее гибкими оказались те виды пазов, в которых осталось не более одного слоя стеклоткани, равномерно покрытой смолой (рис. 3).



а *б*

Рис. 2. Экспериментальный образец двухсторонней платы:
а — резы различной ширины и глубины; *б* — определение угла изгиба



а *б*

Рис. 3. Вид паза:
а — угол изгиба не более 15°; *б* — угол изгиба близкий к 60°

Полугибкие печатные платы, выполненные по технологии локального утонения материала основания (фольгированного стеклотекстолита), не обладают достаточной надежностью, а сама технология не отвечает требованию воспроизводимости.

В отличие от технологии местного утонения базового материала технология изготовления более надежных, коммерчески востребованных (например, в автомобильной электронике) полугибких плат основана на локальном утонении стеклотекстолита над припрессованным тонким слоем относительно гибкого, тонкого стеклотекстолита [6—8].

Базовые материалы

Отличительная особенность полугибких печатных плат — использование в их конструкциях исключительно слоистых фольгированных пластиков на основе эпоксидных смол для жесткой части толщиной 0,5...1,5 мм и для "гибкой" части — 0,1...0,25 мм. Тонкие стеклотекстолиты выдерживают многократные перегибы, когда в них использована пластичная медная фольга (катаная отожженная; IPC-4562) толщиной 35 мкм. В случае полугибких плат, изготавливаемых по тентинг-технологии с металлизацией отверстий, толщина медной фольги базового материала может составлять 18 мкм, но гальванически осаждаемая медь должна иметь повышенное сцепление с поверхностью медной фольги и быть пластичной.

Пластичность меди можно оценить, используя методику испытания медного покрытия по ОСТ 92-5078—99. Прямоугольный образец гальванически осажденной меди, отделенный от поверхности, например, стального технологического носителя, на который проходило осаждение, сгибается и распрямляется в одном и том же месте. Образец должен выдерживать не менее четырех перегибов (перегиб — сгиб и полное распрямление), в противном случае покрытие считается хрупким.

Тонкий стеклотекстолит для полугибких печатных плат также должен быть устойчив к механическим воздействиям: четырех-, пятикратным перегибам при требуемом радиусе и угле изгиба. В данном случае оправданным будет применение стеклотекстолитов, устойчивых к образованию проводящих анодных нитей (CAF), так как зазор между стекловолокнами и связующим (эпоксидной смолой) является не только причиной проявления CAF, но и при изгибе способствует возникновению микротрещин в базовом материале. В стеклотекстолитах устойчивых к CAF применяют специальные аппреты на основе кремнийорганических составов, повышающие связь между стекловолокном и эпоксидной смолой и минимизирующие вероятность возникновения зазоров между ними [9].

Типовая конструкция полугибких плат и ее обоснование

На рис. 4, *а* на стр. 2 обложки представлена структура двухсторонней полугибкой печатной платы, полученной локальным утонением стеклотекстолита над тонким припрессованным слоем "гибкой" части (табл. 1). Жесткая часть при этом может быть многослойной, но поскольку технология относится к бюджетным, то слойность такой платы целесообразно ограничивать 4...6 слоями.

В процессе проектирования полугибкой платы необходимо рассчитать нагрузку на плату и минимальный радиус изгиба. При разработке и производстве платы важно знать толщины текстолита, медного фольгированного проводника, маски на "гибком" участке платы и ширину реза.

С точки зрения теории механики сплошных сред не имеет значения, в какую сторону изгибать плату (по часовой или против часовой стрелки), однако, учитывая особенности трех различных материалов, изгибать плату следует по схеме, приведенной на рис. 4, *б*.

Таблица 1

Параметры полугибких плат

Обозначение	Наименование	Значения	Примечание
A	Толщина гибкой паяльной маски над проводниками, мкм	20...40	Для проводников толщиной 35 мкм
B	Толщина тонкого стеклотекстолита ("гибкой" части), мм	0,1...0,2	—
C	Расстояние от проводников жесткой части до края реза, мм	⩾0,5	Зависит от точности оборудования для механической обработки
D	Ширина реза (ширина "гибкой" части), мм	4...20	Согласно [7]
E	Расстояние от отверстия в жесткой части до края реза, мм	⩾1,9	IPC-2223A
F	Толщина диэлектрика жесткой части, мм	0,5...1,5	—
G	Толщина препрега, мкм	63...180	Зависит от наличия проводников между жесткой и "гибкой" частями платы
H	Перекрытие стандартной паяльной маски гибкой маской, мкм	⩾250	Согласно источнику [7]

Модель изгиба выбрана в силу определенных механических свойств используемых материалов. Во-первых, стеклотекстолит лучше воспринимает сжимающие нагрузки, а паяльная маска для гибких плат лучше работает на растяжение. Во-вторых, после механической обработки паза остаются напряжения в стеклотекстолите, концентрирующиеся в углах сопрягаемых поверхностей и усиливающиеся при приложении внешних нагрузок. Напряжения могут быть как растягивающими, так и сжимающими. По плану напряжения внутренней стороны изгиба будут сжимающими, препятствующими образованию трещин и расслоению стеклотекстолита. Внешнюю сторону изгиба будет маскировать гибкая паяльная маска (рис. 5 на стр. 2 обложки).

В данной механической системе у каждого материала будет свой сжатый, растянутый и нейтральный слой. В дальнейшем речь пойдет о радиусе изгиба именно нейтрального слоя. Объединить одним математическим выражением конструкционные параметры сечения, нагрузку и механические свойства материала поможет гипотеза плоских сечений. Она позволяет вывести кривизну платы от изгибающего момента и характеристик сечения:

$$R = \frac{Ej_x}{M}, \qquad (1)$$

где R — радиус изгиба нейтрального слоя;

M — изгибающий момент, приложенный к гибкой плате;

E — модуль упругости первого рода материала;

j_x — момент инерции сечения относительно главной оси.

Момент инерции — геометрическая характеристика сечения, которой следует оперировать, подбирая геометрические толщины "гибкой" части платы. Ось момента инерции должна быть перпендикулярна к плоскости изгибающего момента. Подставляя момент инерции для прямоугольного сечения в выражение (1), получим прямую зависимость геометрических размеров от радиуса кривизны нейтральной линии:

$$R = \frac{Elh^2}{12}\frac{1}{M}, \qquad (2)$$

где l, h — соответственно длина и толщина сечения.

Со снижением толщины сечения уменьшается радиус изгиба в кубическом соотношении. Именно толщина сильнее всего влияет на изгиб платы. Чем меньше толщина и ширина места сгиба платы, тем на меньший радиус ее можно согнуть, прикладывая один и тот же момент. Как видно из выражения (2), на радиус сгиба линейно влияет момент и модуль упругости. Чем материал менее упругий, тем сильнее его можно согнуть. Аналогично и с прикладываемым моментом — чем больше значение момента, тем меньше радиус изгиба платы. Однако уменьшение размеров сечений сгиба до минимальных приводит к уменьшению жесткости ("гибкая" часть платы разрушается под собственным весом платы); уменьшается прочность конструкции места изгиба платы.

Прочность конструкции по теории плоских сечений определяется следующим выражением:

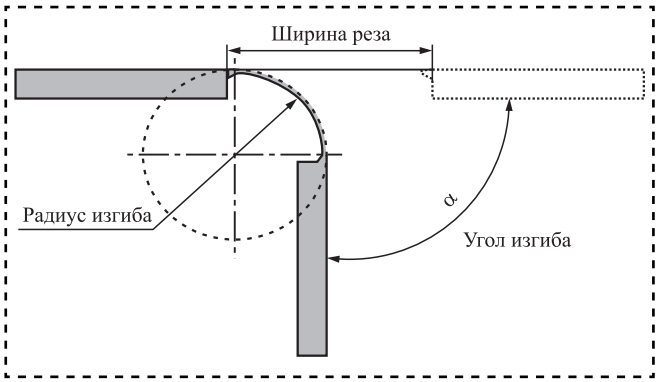


Рис. 6. Основные параметры полугибкой платы [6]

Таблица 2

Соответствие ширины реза углу изгиба

Угол изгиба, °	Ширина реза, мм
45	5
90	10
180	20

$$\sigma_{max} \geqslant \frac{M}{W_x}, \qquad (3)$$

где σ_{max} — предельно допустимая нагрузка на материал;

W_x — момент сопротивления сечения.

Выбранные конструкционные характеристики сечения должны удовлетворять прочности конструкции, т.е. соотношение (3) должно выполняться.

Важный параметр, влияющий на изгиб, — ширина "гибкой" части:

$$S = R\varphi, \qquad (4)$$

где R — радиус изгиба нейтрального слоя;

φ — угол изгиба.

С увеличением требуемого угла отклонения (рис. 6) жестких частей платы и с увеличением радиуса должна возрастать ширина паза (табл. 2).

Технология изготовления полугибких плат

Технологический процесс изготовления двухсторонней полугибкой печатной платы из составного базового материала представлен на рис. 7. Данная технология успешно апробирована в лаборатории "Микротехнологии" кафедры "Электронные технологии в машиностроении" (МТ11), МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Пакет прессуют из толстого текстолита ($S > 0{,}5$ мм) или заготовки внутренних слоев, препрега, и тонкого ($S \approx 0{,}1$ мм) стеклотекстолита для будущей "гибкой" части.

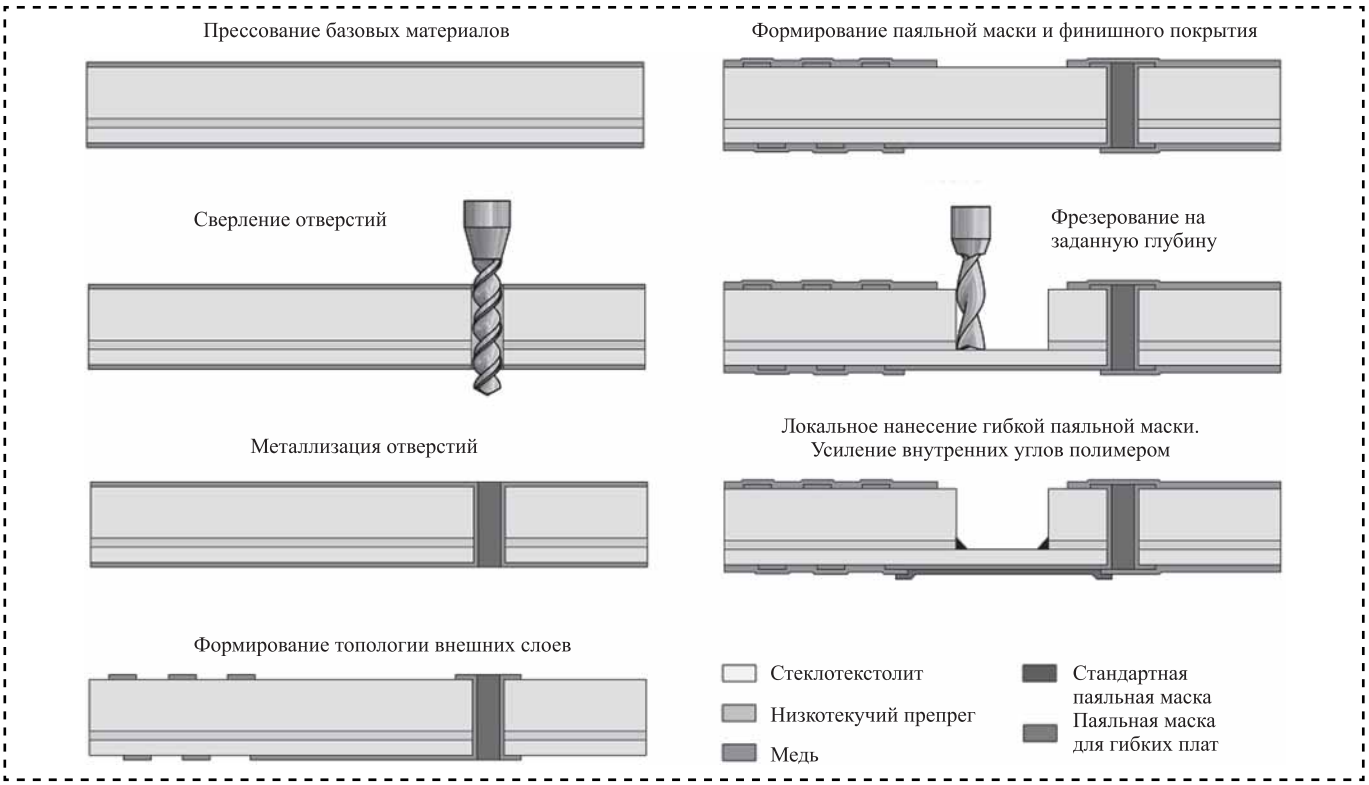


Рис. 7. Технологический процесс изготовления двухсторонней полугибкой платы

а *б* *в*

Рис. 8. Вид паза и гибкой части (*а*); рез над гибкой частью сверху (*б*) и с торца (*в*)

До этапа фрезерования паза технологический процесс изготовления полугибкой платы аналогичен процессу для двухсторонних печатных плат. Производство многослойных плат требует этапа изготовления внутренних слоев перед прессованием внешних слоев стеклотекстолита.

"Гибкую" часть создают путем механического удаления части материала основания и препрега до поверхности тонкого стеклотекстолита с формированием глухого паза. Глубину фрезерования выбирают так, чтобы плоскость дна паза находилась в слое эпоксидной смолы между препрегом и тонким стеклотекстолитом. Это позволяет избежать образования нарушенного слоя стекловолокна на поверхности "гибкой" части, увеличивая ее прочность при изгибах.

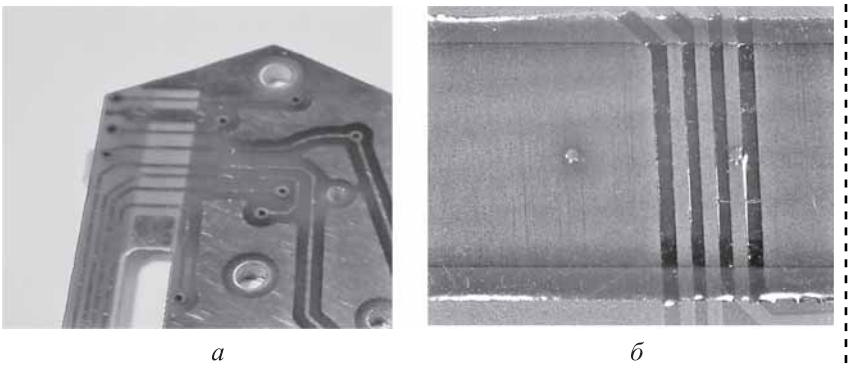
Ввиду малой толщины промежуточного слоя эпоксидной смолы к станку выдвигаются требования точности по оси z. Экспериментально установлено, что фрезерование с использованием ограничителя глубины с точностью установки 5 мкм позволяет достичь желаемого результата. Попадание плоскости реза в слой смолы выражается в виде гладкой блестящей поверхности дна паза, а также прозрачности стеклотекстолита "гибкой" части (рис. 8).

Для обеспечения удовлетворительной шероховатости поверхности паза необходим инструмент, предназначенный для глухого фрезерования, т.е. с рабочим торцом и боковой поверхностью. Образец, представленный на рис. 8, *а*, получен с использованием фрезы с окончанием типа "рыбий хвост" диаметром 1 мм при частоте вращения шпинделя 60 тыс. мин$^{-1}$ и подаче 10 мм/с за 4 прохода с последовательным приближением по глубине (см. рис. 8, *в*).

Так как обычная паяльная маска после задубливания отверждается и становится хрупкой, на "гибком" участке целесообразно применять специальные гибкие паяльные маски [10], сохраняющие эластичность после задубливания и пайки (рис. 9). Эластичность позволит маске сохранять целостность при изгибах, а также создавать меньшие напряжения в деформированном соединении. Однако при больших радиусах изгиба обычная паяльная маска также работоспособна. Так, при ширине гибкой части 4 мм и углах между частями платы при изгибе до 30°, сухая пленочная паяльная маска толщиной 75 мкм не трескалась и не препятствовала изгибу.

Выбор паяльных масок для гибких плат в настоящее время на рынке материалов для производства печатных плат ограничен. Все основные маски перечислены в табл. 3, за исключением жидкой паяльной маски ImageFlex XV601T(T2), производимой SunChemical (Великобритания) и поставляемой в РФ. Техническая информация на нее до сих пор отсутствует в открытых источниках.

Места концентрации напряжений, располагающиеся в углах реза, обязательно должны быть



а *б*

Рис. 9. Защита гибкой части паяльной маской:
а — сухой пленочной для жестких плат; *б* — жидкой двухкомпонентной для гибких печатных плат

Таблица 3

Паяльные маски для гибких печатных плат [11—15]

Маска	Производитель	Тип	Энергия экспонирования*, мДж/см^2	Вязкость динамическая, Па·с	Толщина, мкм	Примечание
R/flex® 8080	Rogers Corp. (США)	Жидкая двухкомпонентная	400...600	19...23	25...50	—
PSR-9000 FXT	Taiyo America, Inc. (США)	Жидкая двухкомпонентная	300...400	16...20	25...50	—
NPR-3300	Nippon Polytech Corp. (Япония), Showa Denko Singapore Pte Ltd. (Япония)	Жидкая двухкомпонентная	400...600	18...24	15...40	COB (Cpip-On-Plate)
NPR-90				17...27	25...75	—
DuPont™ Pyralux® PC 1000	DuPont (США)	Сухая пленочная	200...400	—	25, 38, 51, 64	Динамическая нагрузка
ELPEMER SD 2463 FLEX-HF	Peters GmbH (Германия)	Жидкая двухкомпонентная	200...400	Нет данных	20...40	—

* Для зеленых и окрашенных. Для белых и черных масок требуется энергия в 1,25—1,5 раза больше.

защищены гибким материалом, образующим плавную галтель между вертикальной стенкой жесткой и "гибкой" частями платы [16, 17].

Наиболее часто для этих целей применяют компаунд на основе эпоксидной смолы, например, Hysol™ Eccobond 45 Resin Epoxy Adhesive (Henkel AG & Company, Германия). Материал Eccobond 45 обладает различной твердостью (гибкостью) в зависимости от пропорционального соотношения смолы и отвердителя.

Заключение

Технология изготовления полугибких печатных плат фрезерованием на заданную глубину базового жесткого материала (без прессования) может быть применена только для создания макетов статично нагружаемых гибко-жестких плат, к которым предъявляются невысокие требования по надежности. Рекомендована технология с локальным утонением диэлектрика жесткой части над припрессованным к ней тонким стеклотекстолитом, выступающим в роли "гибкой" части. Технология также подходит для быстрого прототипирования гибко-жестких плат на типовом оборудовании для производства многослойных печатных плат.

Библиографический список

1. **Технологии** в производстве электроники. Ч. III. Гибкие печатные платы / под общ. ред. А.М. Медведева и Г.В. Мылова. М.: Группа ИДТ, 2008. С. 76—86.
2. **Конструирование** гибких и гибко-жестких печатных плат / А.М. Медведев и др. // Компоненты и технологии. 2008. № 6. С. 147—160.
3. **Мельник М.А., Зикий Е.В., Боброва Ю.С.** Прямая металлизация гибко-жестких печатных плат // Будущее машиностроения России: сб. докл. X Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 200—204.
4. **Галецкий Ф.** Плазмохимическая очистка медных торцов в просверленных отверстиях МПП // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2006. № 3. С. 35—41.
5. **Wille M.** Basic Designs Of Flex-Rigid Printed Circuit Boards // OnBoard Technology. 2006. P. 8—12. [Электронный ресурс]. URL: http://www.onboard-technology.com/pdf_giugno2006/060601.pdf
6. **SEMI-FLEX pool.** Dirk Stans // EuroCircuits. 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eurocircuits.com/blog/semi-flex-pool/
7. **Semi-flex-PCB** // ICAPE Group. [Электронный ресурс]. UTL: http://www.icape-group.com/semi-flex-pcb
8. **IPC-2223A.** Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards. Illinois: IPC. 2004.
9. **Печатные** платы: справочник / под ред. К.Ф. Кумбза; пер. с англ. под ред. А. Медведева. В 2-х кн. Кн. 1. М.: Техносфера, 2011. С. 120—387.
10. **Woznicki T.** Flexible Soldermasks. They're good — why not use them? // Flex Circuit News. 1999. P. 1—7.
11. **Best Technology.** [Электронный ресурс]. URL: https://www.bestpcbs.com/design-guide/Rogers-Liquid-Photoimageable-Coverlay.pdf
12. **Taiyo America.** [Электронный ресурс]. URL: http://taiyo-america.com/docs/files/6214/6039/4299/TDS_PSR-9000_FXT_Series_Apr_7_2016.pdf
13. **Nippon Polytech Corp.** [Электронный ресурс]. URL: http://www.nptcorp.com/en/product/npr90/index.html
14. **DuPont.** [Электронный ресурс]. URL: http://www.flexiblecircuitry.com/wp-content/uploads/2017/05/Dupont-PC1000-Coverlay.pdf
15. **Prago Board.** [Электронный ресурс]. URL: https://www.pragoboard.cz/download/sd2463_eng.pdf
16. **Flexible** Circuits, Inc. Design Guide. [Электронный ресурс]. URL: http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/flex-circuit_design.pdf
17. **Krayden Corp. Eccobond 45.** [Электронный ресурс]. URL: https://krayden.com/eccobond-45

УДК 681.5

И.Ф. Ревонченкова
(Институт проблем управления РАН, Москва)
E-mail: rinna@ipu.ru

Проектирование и применение речевого интерфейса в управлении роботом сборки в машиностроении

Рассмотрена модель управления робототехнической системы сборки деталей и узлов в конечный модуль с использованием речевого интерфейса.

The control model of a robotic system for assembling parts and assemblies into a finite module using a speech interface is considered.

Ключевые слова: механосборочный процесс, робототехнические системы, дистанционное управление роботом, интеллектуальный процесс сборки деталей, речевой интерфейс.

Keywords: mechanical assembly process, robotic systems, remote robot control, intelligent assembly of parts, speech interface.

Многие задачи управления технологическими процессами производства требуют использования различных интерактивных (информационных) и манипуляторных (рабочих) роботов.

Интерактивные роботы разрабатывают с широким диапазоном связи и учетом различных условий режимов работы. Это функции сборки, обслуживания, осмотра и ремонта, которые планируются заранее в определенной последовательности действий для достижения конечной цели — обработки детали нужного размера, шероховатости и пр. При этом используют подсистемы визуального контроля, контрольно-измерительные средства и информационные системы диагностики соединений детали и механизмов самого робота для решения различных задач, связанных с процессом сборки готовой детали и технического обслуживания используемого оборудования. Информационные роботы получают данные от различных датчиков и контроллеров и передают их оператору в режиме online и команды в автоматическом режиме непосредственно рабочему роботу.

Рабочие роботы-манипуляторы применяют для технического обслуживания всего оборудования и самих роботов, а также выполнения рабочих операций:

— транспортировки, установки, перемещения и переориентирования объекта обработки;

— центрирование детали, поворот ее на определенный угол;

— соединение и отсоединение конструктивных элементов, электрических разъемов и контактов;

— дистанционное наблюдение и освещение рабочего поля;

— ремонт и переоснащение робота-манипулятора;

— съем контрольных размеров, контроль качества обработки детали, в том числе различных классов точности, гладкости и полировки поверхности.

Все промышленные роботы можно формально разделить на жестко программируемые и интеллектуальные. Первые чаще всего используют для подъемно-транспортных операций. Интеллектуальные (интегрированные) роботы могут производить различные операции по сборке произвольно расположенных частей деталей, "читать" чертеж изделия и самостоятельно оценивать результат сборки и готового изделия. Некоторые роботы запоминают последовательность сборочного процесса и вносят в него необходимые изменения, усовершенствуют его и выполняют до 300 раз-

личных команд одновременно. При этом включается процесс самообучения, основанный на использовании нескольких программ управления.

По характеру управления и информационному обеспечению роботы делят на три группы:

1) жестко программируемые роботы работают в соответствии с заложенной в систему программного управления (СПУ) программой, определяющей последовательность действий, без возможности изменения как самих команд управления, так и последовательности этих команд, жестко закрепленных в определенный цикл действий;

2) адаптивные роботы реагируют на внешние и внутренние команды, т.е. приспосабливаются к изменению условий функционирования и внешней среды; снабжены системой датчиков внешней и внутренней информации и обладают определенной степенью "интеллекта", алгоритмическим программным обеспечением управляющей системы; используют последовательность логических операций с вариантами выбора типа "и", "или" и "не";

3) интеллектуальные роботы используют "искусственный интеллект" и способность по данным, поступающим от развитой сети внешних и внутренних воздействий различных источников информации распознавать и анализировать возникающие ситуации и принимать решения с помощью: интерактивных обучающихся систем, алгоритмов нечеткой логики, математических методов статистики и извлечения информации, прогнозирования, алгоритмов построения деревьев решений и сети Петри, информационного поиска, обучающейся нейронной сети и пр.

В настоящее время в существующих производственных системах сборочного процесса управление промышленным роботом-манипулятором программируется заранее. Программное устройство хранится и опечатывается в специальных шкафах в цехах сборки и их программы не подлежат никаким изменениям в процессе производства, т.е. не предусмотрена никакая адаптация робота к изменению внешней ситуации в каждом конкретном случае.

Управляют рабочим роботом сборки чаще всего с помощью электронного пульта управления физическим воздействием на его интерфейс: нажатием определенных кнопок, вводом команды и дополнительной информации и т.д. Пульт дистанционного управления позволяет проектировать изменение процесса производства, возвращение на один или несколько шагов назад, если они заложены в управляющую программу. Такие команды, как возврат на исходную позицию, изменение поведения робота в зависимости от внешней ситуации в режиме on-line, как правило, не предусматриваются. Вмешательство оператора в процесс сборки возможно в рамках допустимости команд под контролем системы управления роботом. При этом в базе данных (БД) для информационного обеспечения технологического процесса не могут быть перечислены все возможные варианты действий в любой критической ситуации такого сложного процесса, как сборка в машиностроении. Поэтому роботоуправляющая система должна обладать определенной интеллектуальной составляющей.

В производственном процессе сборка деталей и узлов в конечный модуль — наиболее сложный и ответственный этап. При этом совмещение частей, их стыковка, подгонка, корректировка, регулировка — самые сложные операции процесса сборки готового изделия. Они требуют интеллектуального подхода и логического мышления. Поэтому, если процесс сборки прерывается, то в результате происходит отбраковка деталей, что увеличивает себестоимость конечного продукта, ненадежность сборочного узла, затормаживает рабочий процесс и приводит к экономическим потерям. Сборочные операции требуют наибольшей затраты времени (до 40 % всего производственного процесса). Именно по трудозатратам сборки и настройки готового изделия определяют конечный результат процесса сборки и временной цикл его изготовления. Уменьшение отбракованных деталей и использование различных методов доводки и наладки частей и соединений детали — конечная цель применения интеллектуального производственного робота. Особенно это важно в экстремальных ситуациях, когда требуется решать вопросы с максимальной точностью в предельно сжатые сроки и счет идет на доли секунд. Интеллектуальный робот позволяет частично или полностью формализовать процесс сборки в каждый конкретный момент времени, под непосредственным контролем оператора слежения производственного процесса и подсказывая ему возможные варианты выхода из сложной ситуации.

Зарубежные промышленные роботы являются автономными универсальными системами замкнутого производственного процесса, исключающего или частично заменяющего человека. Вмешательства оператора в производственный процесс практически не требуется. Процесс сборки, регулировки и наладки полностью происходит без участия человека. Если происходит останов по внешним или внутренним причинам, то производственный процесс повторяется сначала с использованием других узлов и соединений. Система управления роботом самостоятельно производит функции поиска деталей по образцу, транспортировку и подачу детали под определенным углом, автоматический контроль подводки и введение дополнительных операций в сборочный процесс. Обычно это горизонтально-замкнутый конвейер.

Отечественные современные автоматизированные системы сборки подразделяют на несколько сборочных модулей: роботы-манипуляторы под каждую конкретную операцию, транспортную систему подачи, автономное устройство управления, периферийные и сервисные устройства. При этом на всех уровнях прослеживается модульный принцип компоновки. Цеха формируются из агрегатов и производственных модулей серийного изготовления. Соответственно, именно на серийное производство и направлена комплектация и поставка элементов сборки. Под каждый тип детали смонтирована своя линия сборки со своим набором узлов и комплектующих. Например, структура участков сборки двигателей внутреннего сгорания (ДВС) определяется составом узловой и финишной сборки составляющих. Под каждый тип ДВС (четырех-, восьми- или шестнадцатиклапанные и т.д.) смонтирована своя линия сборки с определенным набором узлов и комплектующих.

Точность компоновки конечного продукта достигается комплексом различных критериев, которые замыкают звенья сборки всей цепи сборочных составляющих и креплений и заложены в конструкции конкретного ДВС. Причем взаимозаменяемость сборочных узлов единичного ДВС бывает различной. Это могут быть операции совмещения или полной замены недоброкачественного сборочного узла, его отбраковка, неполная или частичная замена, подгонка, доводка, регулировка и настройка готовой детали и ее компонентов. Все эти операции и процессы выстраиваются в определенную цепь взаимосвязных операционных действий, каждая из которых имеет собственный ранг значимости по отношению к другим. При этом используется большой набор самых современных и совершенных сенсорных датчиков считывания сигналов как внешних (локальных, телевизионных, оптических, тактильных, температурных и пр.), так и внутренних (датчиков обратной связи, положения, моментов и т.д.). Вся эта информация автоматически фиксируется ПК и анализируется в аналитическом центре центрального сервера. Конечный продукт сборочного процесса также фиксируется центральным процессором и ему присваивается идентификационный оригинальный номер — многозначный код продукции. Запомнить и оперативно использовать эти данные, а также коды всех операций, может только опытный оператор. Для облегчения диалога с роботом сборочного процесса, а также оперативного реагирования оператора на постоянно меняющуюся ситуацию в некоторых случаях бывает необходимость ввода управляющего речевого интерфейса в процесс сборки.

Большинство ручных и транспортно-погрузочных операций можно полностью заменить роботом, но управление им должно быть также оптимальным и рациональным, с учетом скоростного реагирования оператора в данной конкретной ситуации. Вмешательство оператора слежения в процесс сборки должно быть в рамках допустимости и непротиворечивости команд под контролем системы управления роботом. Иногда, при всей интеллектуальности робота, правильный вывод и решение остаются за человеком. При формальном подходе робота-автомата в брак может уйти гораздо больше узлов и соединений, чем нужно, что ведет к повышению себестоимости готового продукта.

В технологическом процессе производства нельзя заранее спрогнозировать и запрограммировать абсолютно все ситуации производственного процесса. Технолог-программист не может знать всех тонкостей сборки, а роботу может потребоваться возвращение на несколько шагов назад для ликвидации сложившейся ситуации или даже возврат на исходную позицию обработки, что довольно сложно предви-

деть и запрограммировать заранее, но вполне возможно заложить в качестве самостоятельного перепрограммирования робота. Критическая ситуация может привести к сбою оборудования при остановке программы работы робота.

В процессе производства и оператору, и программисту может срочно понадобиться консилиум различных специалистов для решения конкретной задачи и выхода из сложившейся ситуации, что опять же невозможно в реальном масштабе времени. В такой ситуации оператору на помощь может прийти составленная заранее система подсказок из БД и баз знаний (БЗ), созданная экспертами или более опытными операторами управления, включающая в себя всевозможные варианты выхода из создавшейся ситуации на выбор оператору. И как результат — автоматически включающаяся в работу отлаженная программистом-технологом программа из заготовленного пакета программ. В этот цикл эксплуатации программного обеспечения включаются элементы самопрограммирования с учетом текущих параметров. На таких принципах строится интеллектуальная система поддержки и принятия решения.

В результате у оператора слежения всегда будет информационное поле поддержки, которое должно быть достаточно простым и построено в виде универсальной, иерархической системы руководства к действию, с конкретными вариантами решений данной проблемы. Она может базироваться на основе современной микроэлементной технической базы в виде Плис-системы высокой степени интеграции, которая сама себе формирует цели и осуществляет самопрограммирование своего поведения. Начальный этап действий этой системы представляет собой "мотивирующий сигнал", который определяет общую цель, без какого-либо начального программирования, но позволяющую использовать блоки заранее заготовленных программ.

Сигналы от датчиков поступают в "электронный мозг" нейрокомпьютера и обрабатываются им в определенной последовательности. Электронный мозг ищет нужную информацию по ключевым словам и создает нейросеть определенной последовательности, после этого на дисплей оператора выдается схема действий. При подтверждении оператором правильности действий производится управление объектом — аниматором или автономным роботом. На корпусе робота размещены контроллеры каналов связи с нейрокомпьютером, сенсоры или преобразователи сигнала с различных датчиков, блок приводов с реверсионным управлением двигателями и поршневые гидравлические приводы. Датчики, как правило, располагают с противоположных сторон и соединяют каналами для двусторонней связи. Они могут быть связаны с двигателями управления роботом жесткой или генетически наследственной схемой управления телом робота. При этом в разрывы узлов пересечения чувствительных и двигательных приводов может быть встроен мини-нейрокомпьютер. Он динамически гибко в реальном масштабе времени управляет действием робота манипулятора, соотнося его движения с текущей ситуацией во внешней среде. Таким образом, происходит адаптация робота-манипулятора к изменениям внешней среды в реальном масштабе времени. Нейрокомпьютер управляет перемещением руки робота в пространстве и в зависимости от внутреннего "сенсорного" или внешнего воздействия — системы управления со стороны оператора слежения. Для этого используется сенсорная матрица, отображающая состояние внутренней и внешней среды робота.

Промышленный робот оснащен системой автоматической смены захватных устройств, приспособлений и инструментов с рукой-манипулятором для проведения действий над объектом манипулирования: сборки, шлифовки, резки, подгонки и прочих операций. В случае необходимости захватные устройства также снабжаются сенсорными датчиками. Система внешней информации накапливает знания в БЗ, а текущие данные о положении и состоянии объектов внешней среды, их расположении по отношению к манипулятору и основной сборочной детали — в БД. Система внутренней информации накапливает данные о функционировании узлов и механизмов робота, его состоянии и устройстве комплектования роботизированной сборочной системы. Эта информация накапливается в БД. Система управления обрабатывает внешнюю и внутреннюю информацию и все поступающие сигналы от сенсорных датчиков. Тензодатчики применяют для определения силы натяжения и сопряжения различных частей детали при

их соединении или свинчивании. Система управления поддерживает управляющую программу, которая содержит команды управления различными частями робота-манипулятора в динамическом режиме при выполнении различных сборочных операций:

— поиск частей детали;

— определение типа, размера и распознавание формы сборочных единиц;

— захват и сложные движения объектов сборки по плоским пропорциям;

— перенос в заданную точку;

— сложный поворот частей детали в трехмерной системе координат;

— ориентирование детали в пространстве;

— формирование в памяти модели детали и модели поведения;

— выбор пути движения в пространстве;

— манипулирование объектом сборки;

— сборка узла по чертежу и пр.

Механосборочный процесс включает в себя:

— подачу деталей;

— выбор сборочных единиц;

— транспортирование узлов и готового изделия;

— установку узла сборки на текущую технологическую позицию;

— распознавание соединительных узлов;

— стыковку различных частей сборки;

— контроль размеров и сопряжения;

— фиксацию и ориентацию частей и соединений;

— измерение и контроль зазоров и поворотов единиц сборки и пр.

На каждой такой операции используют один или несколько промышленных роботов, объединенных в автоматическую линию сборки, совмещающую определенные этапы процесса сборки и наладки готовой продукции.

При механической обработке используют операции резки, шлифовки, крепления, подгонки, смазывания и иногда сварки.

При автоматизации сборочного процесса робот-манипулятор выполняет следующие действия:

— выбор частей детали из навала;

— съем детали из упорного магазина;

— установка детали в сборочное приспособление или спутник сборки;

— фиксация и выборка детали из спутника;

— монтаж—сборка нескольких частей для получения единого сборочного узла;

— измерение детали и соединений;

— оценка качества сборки и готовой детали;

— отбраковка некачественных деталей;

— разборка и расфиксация соединений и пр.

Все эти команды имеют свой приоритет, последовательность и пространственную ориентацию. Процесс сборки — самый сложный этап в промышленном производстве и автоматизации процесса управления. Поэтому при создании системы управления роботизированной сборки должно быть определено огромное поле информатизации процесса сборки, фиксация всех полученных данных в БД и БЗ и автоматизация всех функций при непосредственном применении речевого интерфейса для обеспечения дистанционного управления и принятия правильного решения в любой производственной ситуации.

От оператора слежения и управления требуется быстрота реакции, точность формулировки команды и очень высокая квалификация. Часто при этом работы проводятся в условиях частичного или полного отсутствия доступа оператора к процессу производства. Иногда присутствие оператора в непосредственной близости от управляемого объекта вообще недопустимо, т.е. может быть опасно для здоровья и жизни человека. Эти экстремальные ситуации не позволяют человеку вмешиваться в действия робота без его перепрограммирования. Для решения различных проблем, сбоев в работе робота, незапланированных остановов и аварийных ситуаций создаются специальные подсистемы дистанционного визуального контроля с помощью контрольно-измерительных устройств и принятия решений на основе различных математических методов вычислений и прогнозирования.

Многие задачи управления технологическими процессами сборки требуют использования не только контактных роботов, но и интерактивных, которые представляют собой системы с широким диапазоном действий и связей в различных условиях режимов работы объекта управления. Интерактивный робот для достижения конечной цели может вносить поправки в процесс сборки, изображенный на дисплее оператора в виде виртуальной системы. При этом планирующие системы управления должны включать в себя все допустимые операции обработки детали и их виртуальное проектирование.

Контрольно-измерительные устройства осуществляют непосредственный контроль на удаленном объекте производства. Они измеряют температуру, силу давления, углы движения, плотность контакта сборочных узлов и передают все эти данные на виртуальную систему слежения для оператора. Для этого создают специальные системы визуального контроля с выводом информации на интерактивную панель или дистанционное устройство управления с дисплеем. Результаты диагностики оборудования робота и проводимых им операций сборки детали также дистанционно передаются на дисплей оператора и его пульт управления. Оператор руководит процессом производства в интерактивном режиме и может оценить ситуацию в любой момент времени, а также принять правильное решение, используя развитую систему подсказок и звуковых сообщений системы управления роботом на естественном языке. При этом оператор слежения может вмешиваться в работу робота-манипулятора, вносить поправки и изменения в режимы работы, давая команды также на языке, понятном для системы распознавания речи.

Решения, лежащие за пределами стандартного технологического процесса, требуют нестандартного мышления, интеллектуальной обработки информации при переустановке приоритетов последовательности действий. Это может быть вредное воздействие окружающей среды или действия, противоречащие основным действиям робота и его сохранности, возможные последствия, которые могут нанести вред и вызвать поломку механизма манипулятора.

Для принятия правильного решения требуется математическое вычисление вероятности отказа оборудования и прогнозирования конечного результата. В таких ситуациях для принятия определенных действий и предотвращения поломки робота или его длительного простоя оператору требуется внешняя помощь и интеллектуализация системы управления, способной в очень ограниченный период времени, в режиме on-line с привлечением виртуального нейрокомпьютера сделать определенные выводы и провести нужные вычисления для принятия единственно правильного решения. Эта система высокой степени интеграции может сама себе формировать цели и осуществлять действия без перепрограммирования извне. На выходе формируется определенный сигнал, результирующий все поступающие данные и проводящий оценку внешней и внутренней ситуации. Он динамически гибко в реальном масштабе времени управляет действием робота-манипулятора, соотнося его действия с изменением внешней среды и состоянием технологического процесса. Оператор слежения только подтверждает статус последовательности действий робота, определяемых командами, созданными электронным мозгом нейрокомпьютера.

Использование новейших информационных технологий, в частности нейрокомпьютеров и методов построения нейросетей для распознавания дискретной речи, ставит процесс производства на более высокий уровень. Только при данном условии возможен гарантированный и стопроцентный контроль качества и скорости управления технологическим процессом сборки с использованием промышленных роботов.

В технологическом процессе каждые команда, операция, каждый сбой и останов имеют свой технологический код шифра. При составлении иерархически структурированной БД в рамках технологического процесса происходит накопление данных по всем возможным вариантам действий в том или ином случае. Эти данные вносят и корректируют специалисты-эксперты технологического процесса. Они формируют основу информационной системы, дальнейшее ее расширение происходит в процессе накопления опыта и знаний оператора слежения за роботом сборки и процессора нейрокомпьютера. Команды управления и сообщения о сбоях вполне однозначны и довольно лаконичны. Поэтому взаимодействие автоматизированной системы управления и оператора с помощью речевого интерфейса существенно упростит процесс накопления знаний в БД. При этом оператору слежения не требуется запоминать все коды наизусть, а также вводить управляющие команды с клавиатуры. Используя БД конкретных причин сбоев и комментариев к ним, а также БЗ подсказок к ликвидации неисправностей и сбоев в виде речевых сообщений существенно сократит общее время реакции системы и управления.

Автоматическая система управления роботом с использованием нейрокомпьютера спо-

собна к самообучению, настройке на обстоятельства, а также голос оператора, его тембр и речевые особенности произношения. Недостаточность информации компенсируется с помощью экспертной системы, построенной нейронной сетью и математических методов прогнозирования. В идеале интеллектуальный робот способен понимать язык оператора и вести диалог с человеком, формировать модель внешней среды и своего поведения в реальных условиях. Некоторые из них могут распознавать и анализировать образы, формировать 3D-модель готового узла детали и саму модель конечного продукта. Обладая определенным интеллектом, они способны формировать понятия, планировать свое действие, подсказывать оператору различные варианты действий с его стороны в той или иной ситуации, анализировать целесообразность этих действий в условиях неопределенности. Таким образом, происходит процесс адаптации интеллектуальной системы робота сборки в реальном масштабе времени и в конкретной ситуации. Оператору нет необходимости подходить к линии сборки, для этого используют специальную гарнитуру, беспроводной микроконтроллер и ПК. Для обеспечения безопасности системы и предотвращения постороннего внедрения в систему управления линией сборки и идентификации голоса оператора запускается автоматическая система идентификации голоса по устной речи (АСИГУР).

Речевой интерфейс в этом сложнейшем процессе занимает главенствующее место, без него совершенствование производственного процесса интеллектуальной сборки сложнейших деталей и механизмов просто невозможно. Поэтому процесс интеллектуализации промышленных роботов идет параллельно с совершенствованием систем распознавания речи. Интеллектуальный робот — это система, которая с помощью управляющей программы может полностью или частично формировать свою среду и свои действия в соответствии с поставленной задачей и под непосредственным контролем человека.

Информационная система управления сборочным процессом вместе с производственным комплексом должна быть экономически оправдана, т.е. усилия на его автоматизацию, программирование робота на определенные операции, его перепрограммирование в условиях эксплуатации и корректировка действий в реальном масштабе времени должны окупаться в процессе эксплуатации всей системы.

При проектировании маршрута обработки сборочного процесса необходимо наметить общий план действий. Есть определенный стандартный путь и последовательность обработки заготовки. Для выбранного пути обработки выбирают тип оборудования, технологическую оснастку и соответствующие станочные приспособления. Определяют предполагаемое содержание операций, необходимых в ходе сборочного процесса. Оформляют техническую документацию, маршрутные технологические карты и эскизы будущей заготовки или готового изделия в сборке. Эту информацию заносят в память компьютера, управляющего роботом, и компьютера, управляющего всем производственным процессом.

Так, например, при формировании процесса сборки готовой детали требуется токарная обработка ступицы шестерни передачи. На токарную операцию выбирают оборудование определенной фирмы, которое хорошо себя зарекомендовало. Далее просматривают технические характеристики станка и его оснащение, соответствующее числовое программное оборудование, продумывают систему активного контроля и мощность привода, определенный набор инструментов, применяемых для токарной обработки детали: резец проходной, резец сборный подрезной, резец сборный расточной и пр.

Далее рассчитывают режимы резания с учетом характеристик обработки, типа и размеров заготовки, размеров соответствующих инструментов, материала его режущей части, материала и состояния заготовки, расчета припусков и типа оборудования, а также элементы режимов резания и сборки: глубину резания, подачу, скорость резания, частоту вращения и все переходы. При этом должны быть рассчитаны силы резания в зависимости от требуемой точности размеров допуска и шероховатости обработанной поверхности детали. После завершения операции токарной обработки детали полученные от датчиков параметры сравнивают с эталонными данными. Проводят подгонку, шлифовку, соединение и сборку элементов готовой детали. При этом определяют типы и оснастку для резцов, операции протяжки и приспособлений для протягива-

ния, комбинированных сверл, метчиков, зажимных приспособлений, патронов. Далее следуют зачистка и шлифовка. Рассчитывают режимы резания и сборки в зависимости от заданных параметров требуемой степени точности размеров и шероховатости обрабатываемой поверхности при чистовой обработке соединений и элементов.

В процессе управления сборкой и подгонкой различных частей детали формируется большое количество данных, собираемых с датчиков измерения и контроля. По ходу действий требуется обработать огромное количество информации для правильной рекогносцировки данной детали на месте и составления плана маршрутизации операций сборки и подгонки различных соединений готового продукта. Все это необходимо заранее определить для обоснования выбора оборудования и средств технического оснащения, вложить требуемые параметры детали, допусков и соединений.

На рис. 1 изображена последовательность действий при формировании БД поступаю-

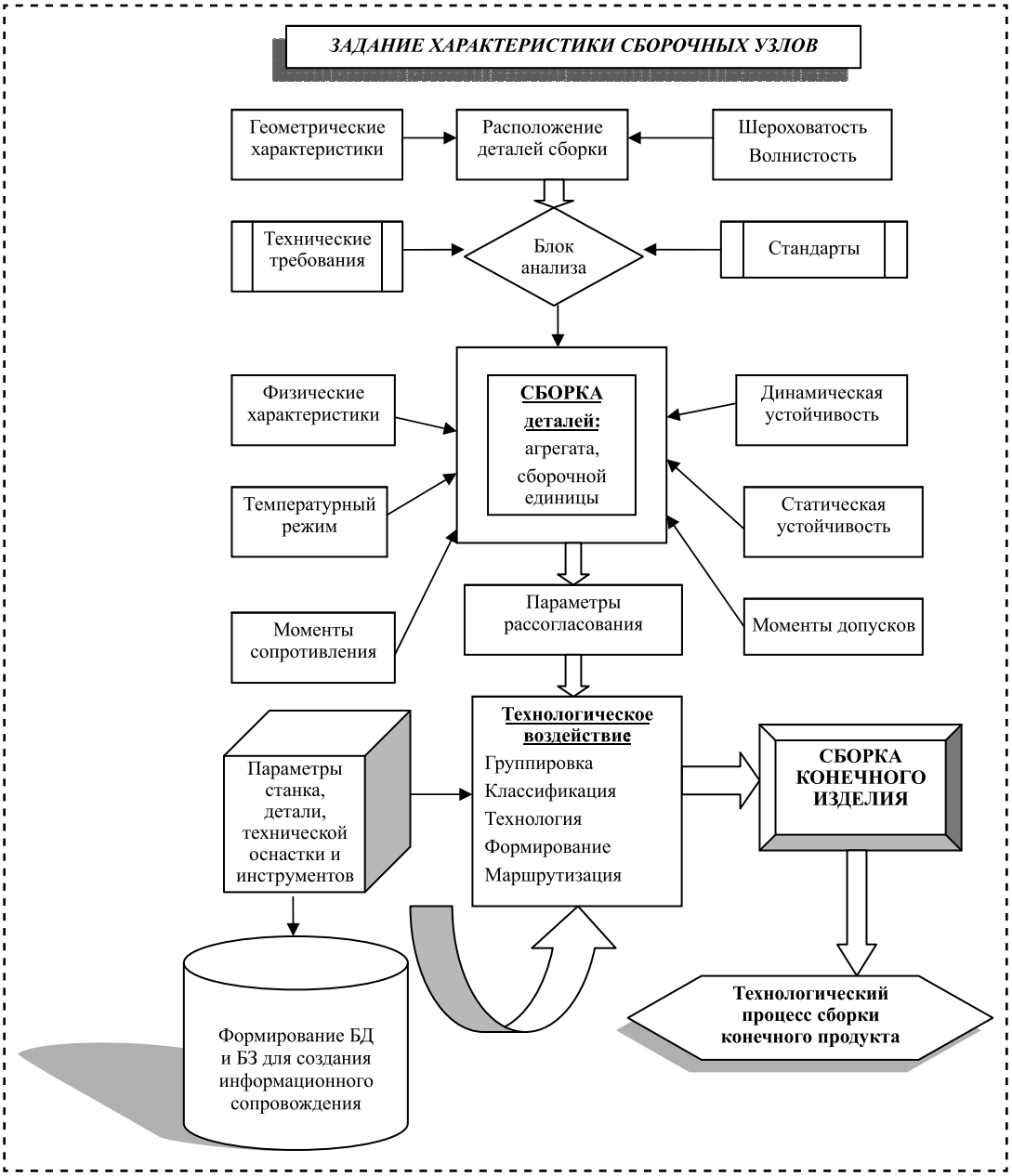


Рис. 1. Структурная схема сборочного процесса с учетом эксплуатационных характеристик готового изделия

щих данных обработки с учетом выбранных характеристик конечного продукта.

Широкая номенклатура работ технологической сборки изделия на всех стадиях сборки должна соответствовать принципу стандартизации. Только формирование четкой и иерархической системы автоматизации подготовки производства позволяет решать задачу любой сложности процесса сборки в условиях минимизации временного периода. При этом в сборочном процессе заранее невозможно предусмотреть и запрограммировать абсолютно все внештатные ситуации и варианты выхода из них. Это создает определенные трудности в реальном процессе управления сборкой. Но возникшие проблемы в наибольшей степени могут быть преодолены оператором слежения в режиме on-line с помощью речевого интерфейса управления процессом сборки и интеллектуальной системы поиска и принятия решения. В данном случае речевой интерфейс осуществляет рабочую буферную часть диалога с роботом, а также промежуточное накопление информации о процессе производства.

Сообщения о штатных и нештатных ситуациях, контроль качества произведенных операций и состояния внешней среды передаются с помощью инициатора сообщений на естественном языке, для чего проводится составление и синтез ответа на запрос. Это может быть либо самостоятельное сообщение о текущей ситуации, либо предупреждение, либо предложение о необходимости проведения тех или иных дополнительных операций. Система подсказок и оперативное решение проблем в конкретной ситуации, не только создадут нормальные условия работы управляющей системы робота, но смогут решить многие задачи, связанные с оперативностью принятия решения оператором в режиме on-line.

Для примера рассмотрим возможные варианты останова в работе робототехнической системы. Сбои в процессе работы робота можно классифицировать следующим образом: неисправности оборудования, временный останов по техническим причинам, отсутствие подачи комплектующих, ожидание комплектующих. Неисправность оборудования можно характеризовать следующими моментами: нарушение связи, блокировка питания, перегрев оборудования, неисправность оборудования, отсутствие масла в устройстве и т.д. Временный останов по техническим причинам может быть диагностирован как одна из следующих операций: подъем упора, отвод упора, установка упора, подъем манипулятора, спуск манипулятора, перемещение манипулятора, замена захвата и т.д. Останов по причине ожидания комплектующих и механизмов может быть следующий: деталь не адаптирована, отсутствие детали, пневмоподача детали, сортировка деталей, отсутствие детали, отсутствие необходимого оборудования для робота и т.д.

В этом списке прослеживается определенная последовательность взаимосвязанных операций, которые требуют подтверждения либо отмены определенных действий оператора слежения. Поэтому можно составить классификацию всех возможных сообщений и команд оператора в автоматизированной системе управления с речевым интерфейсом. Это дает возможность гарантированного стопроцентного контроля качества работы робота-манипулятора при высокой скорости технологического процесса. Иерархический граф последовательности обработки сообщений и их классификация изображены на рис. 2.

На практике каждый сбой в работе механизма или технологический останов имеет свой код шифра, которому соответствует определенное сообщение или операция. Все это фиксируется в БД. При этом запоминается в памяти ПК последовательность действий и возможные варианты выхода из создавшейся ситуации. В БЗ автоматически запоминаются сообщения и сохраняются все стандартные формы предложений для создания сообщений

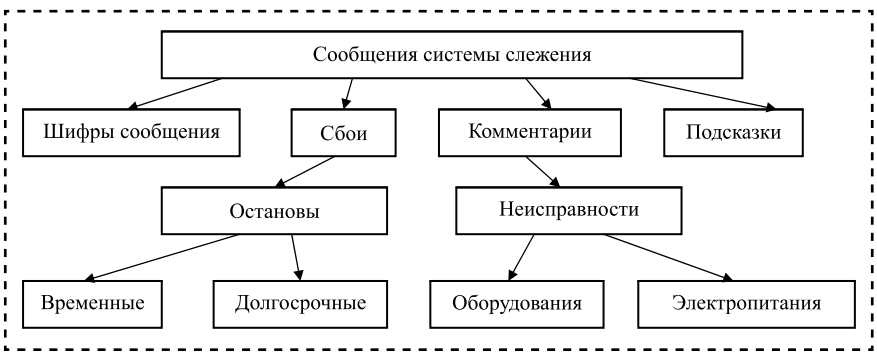


Рис. 2. Классификация сообщений автоматической системы слежения

оператору. Полученное сообщение для управляющей системы также отображается на дисплее после распознавания речи оператора и его команд. Там же отображаются различные варианты решения проблемы оператору слежения для ликвидации затруднений в создавшейся ситуации. Имитатор речи используется для озвучивания созданного системой ответа, а также он может дублировать сообщение оператора и его приказы, прошедшие распознавание, подтвержденные системой управления как не противоречащие технологическим правилам и стандартам сборочного процесса.

При проектировании управляющей системы робота можно ограничиться системой распознавания речи с минимальным набором команд, необходимых для управления, созданием ограниченного словаря и использовать специальные термины, воспринимая отдельные слова как минимально значимые единицы. Каждое слово в предложении будет представлять собой отдельный языковой знак. Ему присваивают свой приоритет в предложении и составляют граф иерархии в предложении или команде оператора.

Команда управления, как правило, произносится оператором ясно, кратко и четко, при этом все слова изолированы. Поэтому нетрудно, в отличие от слитной речи, установить начало и конец слова и фразы в произносимых оператором командах. Акустические признаки зависят только от конкретного слова, поэтому задача автоматического распознавания речи еще более упрощается и сводится к выдаче результата в виде орфографии и синтаксиса. Это существенно облегчает работу оператора, но при этом нужно учесть, что диалог с роботом происходит в условиях постоянной динамики операционной ситуации.

В команде выделяются главные, так называемые "ключевые слова", управляющие всем предложением. Например, в команде: "Установить и закрепить суппорт на 1,5 мм", ключевыми словами будут слова "суппорт" и "закрепить". При распознавании конкретной команды достаточно выделить "ключевые слова", к которым привязать остальные в иерархическом порядке. "Ключевыми словами", как правило, являются существительное и (или) глагол. Если слова произносят довольно четко и определенно, то можно использовать начальный словарь из 100...200 слов. По мере необходимости проводится "доучивание" системы управления, т.е. накопление знаний в БЗ. Этот процесс называется интеллектуализацией робототехнической системы и ее самообучением. Изолированно произнесенные слова на естественном языке распознаются по упрощенной схеме (рис. 3).

В последнее время разработаны отечественные системы автоматизации проектирования технологических процессов механической обработки деталей: КОМПАС-Автопроект, ТехноПроБазовая, T-FLEX Технология, ADEM, Timeline, ВЕРТИКАЛЬ [3]. При этом не так уж много САПР может реализовать задачу проектирования технологического процесса сборки, используя идею единой информационной модели изделия. А еще меньше САПР имеют привязку к голосовому интерфейсу. В качестве промежуточной модели можно выделить инструментарий САПР ВЕРТИКАЛЬ фирмы "АСКОН" (Россия). Она способна решить большинство задач автоматизации ТП, а версия САПР ВЕРТИКАЛЬ V3 непосредственно предназначена для реализации проектировочного процесса сборки и проектирования 3D-модели конечного узла (рис. 4).

Комплектуют будущие составляющие детали последовательным добавлением объектов технологического состава, импортируемых из списка комплектации КОМПАС-3D и ЛОЦМАН (справочника "Материалы и сортименты").

При проектировании маршрута обработки детали или заготовки необходимо:

— наметить общий план, т.е. создать последовательность обработки заготовки;

— выбрать тип оборудования и технологической оснастки, станочных приспособлений и инструментов для дополнительной токарной или фрезерной обработки;

— оформить технологическую документацию, маршрутные технологические карты и эскизы готового изделия.

Рис. 3. Структурная схема устройства ввода и распознавания команды с изолированно произнесенными словами

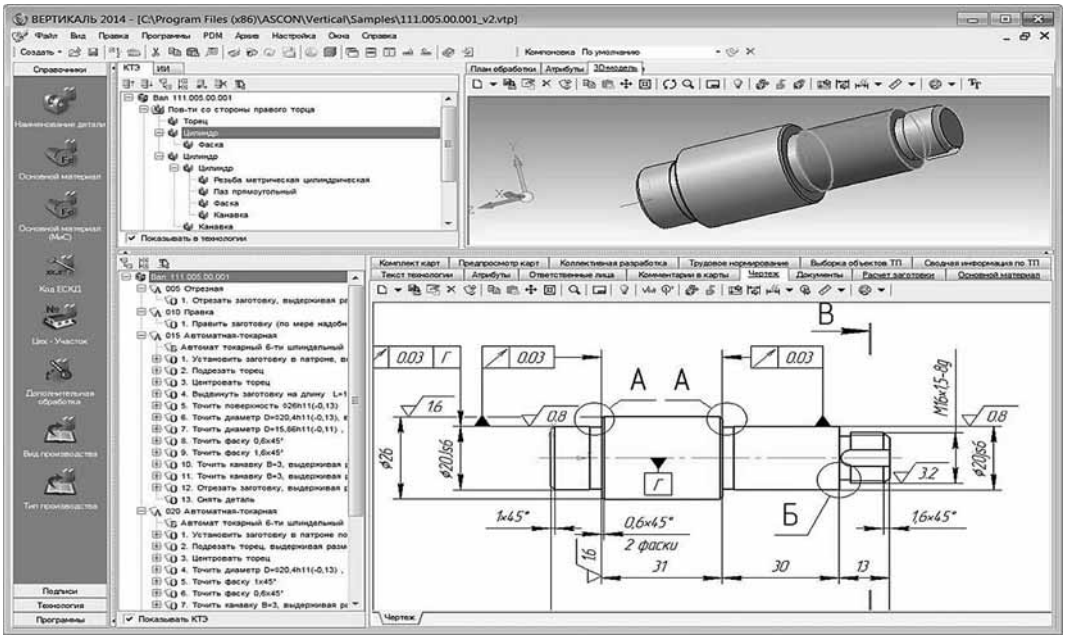


Рис. 4. Пример проектирования технологического процесса сборки детали с помощью системы ВЕРТИКАЛЬ

При работе с системой проектирования сборочного процесса САПР ВЕРТИКАЛЬ V3 это происходит автоматически. Выбор нужной операции и приспособлений проводится на этапе проектирования готового изделия, применительно к точности его размеров, материала для изготовления, режимам обработки заготовки, требуемой степени шероховатости готового изделия.

В процессе окончательного оформления заказа на сборку узла или запуска новой команды оператора происходит выбор одной из предложенных системой операции в дереве комплектования ТП сборочной единицы из соответствующего списка:

— комплекс;
— стандартное изделие:
— сборочная единица; деталь;
— материал; комплект и т.д.

После этого формируется список необходимых комплектующих деталей, а также создается технологический процесс непосредственной сборки детали [7].

Применение речевого интерфейса при проектировании технологического процесса сборки упрощает взаимосвязь различных объектов управления с оператором слежения. Общение с управляющей системой на естественном языке и принятие решения с помощью подсказок, предоставляемых ее интерфейсом, сокращает время "обдумывания" ситуации оператором и, соответственно, время простоя сборочной линии.

Большинство существующих систем распознавания речи (СРР) зависимы от диктора. Он должен сначала обучить систему, правильно произнося определенный текст, но существуют системы независимые от диктора — программы-навигаторы, ориентированные на дискретную речь. В технических системах, предназначенных для слежения за производственным процессом, возможно использование именно таких СРР.

Базы данных многих зарубежных фирм — производителей роботов (SIEMENS, FISHER, FOXBORO, ABB) используют в качестве языка общения робота формализованный язык. Он требует не только знаний самого языка страны-производителя, но и узкоспециализированного языка профессионалов. При этом требуются соответствующие профессиональные знания. Управление роботом рассчитано на специальное обучение операторов, которого фирма-производитель не предоставляет, направляя на производство своих высококвалифицированных специалистов сборочного процесса в ранге инженера [4].

В последних разработках на фирме SIEMENS используется следящая система

фирмы SIMATIC, сопряженная с вычислительной техникой. Получены существенные результаты по практической реализации совместимости оборудования слежения — контроллеров и персональных компьютеров — регистраторов производственного процесса. БД используют в качестве языка общения формализованный язык (ФЯ). Он требует узкоспециализированных знаний и рассчитан на специальное обучение операторов слежения, что требует от производства дополнительных материальных и временных затрат. При этом их обучение проводят в стране-производителе аппаратных средств.

Поэтому необходимо разрабатывать отечественные робототехнические системы, применяя системы речевого управления на русском языке. Это производственная необходимость и этого требует современный уровень производства. Как показала практика, областями наиболее целесообразного применения речевого ввода информации является дистанционное управление действиями робототехнических систем в условиях производства, в том числе вредного и опасного, использование робототехники для чрезвычайных условий, катастроф и экстремальных условий функционирования.

Предлагается принципиально новый подход к решению этой задачи. Для разработки системы слежения за производственным процессом возможно использование локальной вычислительной сети с терминалами и центральным сервером. Следует рассмотреть вопрос о выборе наиболее эффективного подхода к созданию архитектуры локальной сети. Это налагает определенные требования к использованию БД и БЗ, их формированию, защите информационных ресурсов, идентификации личности оператора, распознавания его речи и ее особенностей.

При этом возникает проблема создания и использования естественного языка (ЕЯ) для формирования языка общения управляющего компьютера не только с пользователем, но и с роботом. Это требует интеллектуализации диалога оператора с ПК и систематического наращивания знаний в БЗ. Необходим перевод инструкций, заложенных в программный продукт фирмы-изготовителя на русский язык. Наиболее логично использование программы-переводчика и формализатора, преобразующего запрос, сформулированный на естественном языке оператора, в формальный запрос конкретной БД. При этом используется система подбора формальных слов из словаря переводчика (STYLUS, SOKRAT и пр.). Один тип перевода основывается на отдельном использовании программы-переводчика, а второй — на включении программы-переводчика в БД.

На сервере и в отдельных ПК на станциях сборки локальной сети должны быть заложены словари-формализаторы. В них содержится определенный набор значащих (ключевых) слов и по ним формируется исходящее или входящее сообщение, на основе которого блоки информации из БЗ позволяют расширять сообщение, которое связано с формальным сообщением двусторонней связью. Далее составляется системное задание на обработку детали или формируется команда на операцию устранения сбоя или неполадки. На выходе при подтверждении оператором правильности выбора команды формируется управляющий сигнал на контроллер с помощью блока модуляции, встроенного в ПК. Потом в обратной последовательности, из сообщения контроллера о произведенных тех или иных действиях системы.

Единственная, оставшаяся окончательно нерешенной проблема для речевого управления процессом производства, — наличие различных механических шумов, наложенных на речевое сообщение. Шумы могут искажать речевой сигнал до неузнаваемости, процесс переспроса затягивается и производство останавливается на неопределенное время. Существует несколько методов, позволяющих отфильтровать голосовой сигнал от шумовых наводок и посторонних сигналов. Все они применяются на практике, но не позволяют полностью очистить речевой сигнал от шума без потери его информационной составляющей. Эта проблема в определенной мере может быть решена с помощью достаточной звукоизоляции оперативного помещения и специальным оборудованием для шумоподавления. Использование вычислительных математических методов спектрального анализа и фильтрации речевого сигнала от посторонних шумов различной этиологии закрепит полученный результат.

Обработка звукового сигнала осуществляется на основе математического моделирова-

ния технологического процесса и алгоритмов компьютерной обработки сигнала в пределах приближения к физической реальности производственного цикла сборки. Критерии точности воспроизведения речевого сигнала оцениваются с помощью методов математической статистики и теории вероятности: вычисление коэффициента разборчивости сигнала, эквивалентное отношение мощности сигнала к мощности стационарного шума, среднее значение мощности сигнала в пределах конечного интервала, а также среднее значение по множеству случайных переменных.

В процессе распознавания слов и предложений задействуются различные словари, в том числе спектральный и орфографический словари и словарь синтаксических правил, накопитель орфографии слов, база слов и словосочетаний, словарь лексических правил. Кроме того, проводится статистический анализ и формируется счетная матрица слов и словосочетаний. Для этого используется динамическое программирование и задействуется блок предсказаний.

При решении задачи речевого управления робототехнической системой, обладающей свойствами адаптивности, необходимо рассматривать всю проблему в целом [1]. В общей схеме работы автоматизированной системы управления роботом с помощью речевого интерфейса можно выделить следующие подзадачи управления:

— составление грамотного, четкого приказа — требования;

— отсечение шумов и наводок из акустического сигнала;

— составление иерархического списка команд в БД;

— формирование фонетического словаря;

— формирование акустического словаря;

— составление предложения из слов;

— синтез запроса системы;

— составление и накопление знаний в БЗ всех возможных вариантов запросов;

— управление многоярусной системой диалога;

— определение начала и конца диалога;

— размыкание последовательности диалога в сложной ситуации;

— фиксация и контроль рабочей ситуации;

— возможные варианты отката в режиме работы робота;

— составление и синтез ответа системы при выполнении той или иной операции;

— формирование комментариев к выполненной команде;

— составление формы отказа от выполнения операции и комментарии к нему;

— формирование ответа выполненных операций.

Оператор с помощью голосового интерфейса отдает команды о необходимых операциях в систему управления робота [2]. Задавая параметры детали, установки заготовки или узла, сформулировав переходы механообработки, задав режимы обработки и нормы времени на обработку. А система сама выполнит заданную программу, проведя необходимые расчеты, определит необходимый набор инструментов и решит, как наиболее оптимально провести ту или иную операцию.

Совмещение проектирования сложных операций сборки деталей и стыковки различных узлов с использованием речевого интерфейса для управления этим процессом в режиме online — это перспективное направление применения системы распознавания речи и САПР.

Выводы

Сборочные технологические процессы отличаются большим разнообразием операций, высокой трудоемкостью и необходимостью быстроты реагирования как самой системы управления роботом, так и реакции оператора слежения. В результате самообучения робототехнической системы в памяти ПК наращивается огромное количество данных, которые следует систематизировать, классифицировать и создать для них специальную иерархическую систему организации и хранения. При этом базовая настройка и основные программные средства остаются неизменными.

Предлагаемый концептуальный подход сравнительно новый и включает ряд следующих преимуществ в разработке технологического процесса ведения диалога с управляющей системой робота сборки и использования речевого интерфейса в процессе производства:

1) повышение точности измерений, уменьшение погрешностей измерения и вычислений за счет применения цифровых алгоритмов обработки аналоговых сигналов и исполь-

зования дополнительных средств контроля сопрягаемых параметров из БД и погрешностей измерения;

2) непрерывный мониторинг системы в реальном масштабе времени и скоростная обработка сигналов о возможных сбоях и остановах в сборочной системе;

3) расширение платформы реализованной системы за счет внедрения новых алгоритмов и вычислительных методов в процесс сборки;

4) применение речевого ввода команд обеспечивает ускорение процесса настройки и отладки сборочной системы и робота;

5) дополнение процесса распознавания команд оператора системой подсказок БЗ для ускорения процесса самообучения системы и принятия решения;

6) возможность оперативного вмешательства в цикл производственного процесса сборки в on-line режиме;

7) привязка СРР к технологическому процессу сборки.

Применение предложенного метода поможет повысить работоспособность сборочной робототехнической системы и позволит снизить ее эксплуатационные расходы. Автоматизированная система управления производственным процессом сборки, интегрирующая модули прогнозирования и непрерывного мониторинга сборочного процесса с использованием речевого интерфейса гарантирует постоянную максимальную эффективность эксплуатации СРР совместно со сборочным процессом, снижая вероятность аварийных остановов.

Библиографический список

1. **Потапова Р.К.** Речевое управление роботом. М.: URSS, 2005. 324 с.

2. **Рыбина Г.В.** Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика, 2010. 430 с.

3. **Иванов А.А.** Автоматические сборочные системы. М.: Форум, 2012. 335 с.

4. **Берлинер Э.М., Таратынов О.В.** САПР технолога-машиностроителя. М.: Форум, 2015. 335 с.

5. **Самаркин А.И., Самаркина Е.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А.** Автоматизированное проектирование технологических процессов сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 1. С. 19—24.

6. **Ревонченкова И.Ф.** Особенности создания системы распознавания речи в управлении роботом // Международная научная конференция INTELLECTUAL MACHINES. М.: МГТУ (МАМИ), 2009. С. 95—99.

7. **Ревонченкова И.Ф.** Особенности использования роботов с применением речевого интерфейса при автоматизации механосборочных работ в машиностроении // "CAD/CAM/PDM — 2016". М.: ИПУ РАН, 2016. С. 206—210.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

☑ *За наличный и безналичный расчет.*
☑ *С любого номера и на любой срок.*
☑ *Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: 8 (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 620.162

В.В. Есаулов, *канд. техн. наук,* **Д.С. Бородулин, С.Н. Картусов, Т.Е. Рожко, Ю.Ю. Юдин, А.В. Колосков, А.В. Полторакин, А.Ю. Шашков**
(Филиал ФГУП "Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры" "Научно-исследовательский институт прикладной механики" им. академика В.И. Кузнецова", Москва)
E-mail: 073@niipm.ru

Исследование возможности герметизации интегрально-оптической схемы герметиком ВГО-1

Исследована эффективность применения герметика ВГО-1 в различных конструкциях, в частности, в интегрально-оптических схемах (ИОС) с помощью методов течеискания и ИК-спектроскопии. Даны рекомендации по использованию герметика ВГО-1 (для соединений типа сплав 50Н — герметик ВГО-1 — сплав 50Н) в конструкциях герметичных устройств.

The efficiency of VGO-1 sealant in different constructions, specifically in integrated optical circuits, is investigated using leak detection and IR spectroscopy techniques. Recommendations are given on the use of VGO-1 (connections of type Alloy 50N — sealant VGO-1 — Alloy 50N) sealant in constructions of hermetically sealed devices.

Ключевые слова: герметик ВГО-1, интегрально-оптическая схема, течеискание, ИК-спектроскопия.

Keywords: VGO-1 sealant, integrated optical circuit, leak detection, IR-spectroscopy.

Цель исследований — оценка степени негерметичности соединений типа сплав 50Н — герметик ВГО-1 — сплав 50Н; проверка герметичности сборки ИОС и надежности герметизации ИОС при термоциклических воздействиях.

Герметик ВГО-1 ТУ 38.303-04-04—90 [1] производства Казанского завода СК им. С.М. Кирова — пастообразная композиция белого цвета, обладающая способностью вулканизоваться при комнатной температуре при контакте с влагой воздуха.

Герметик ВГО-1 однокомпонентный и предназначен для поверхностной герметизации конструкций, приборов, резисторов, различных изделий радиоэлектронной техники, работающих в воздушной среде при температурах от −60 до +250 °С, а также для ремонта изделий, загерметизированных герметиками типа "Виксинт".

Контакт с герметиком ВГО-1 при температурах прогрева до 250 °С не вызывает коррозии алюминиевых сплавов анодированных неплакированных, анодированных, анодированных плакированных с наполнением анодной пленки хромпиком, неанодированных плакированных, серебряного покрытия, стали углеродистой без защиты.

Физико-механические свойства герметика ВГО-1

Внешний вид	Пастообразный однородный материал белого цвета без видимых механических включений
Жизнеспособность, ч, не менее	0,17
Условная прочность при разрыве, МПа, не менее	2,0
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	250
Твердость по Шору А, не менее	28
Прочность связи (адгезия) герметика с металлом при отслаивании от алюминиевого сплава Д16 (разрыв по материалу или отслаивание по сетке), кН/м, не менее	1,7
Плотность, кг/м^3	$1{,}9 \cdot 10^3$

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Для исследований подготовлены следующие объекты:

— макет фланцевого соединения сплав 50Н — герметик ВГО-1 — сплав 50Н ФС № 1 (рис. 1);

— корпус ИОС — два образца — ИОС № 1 и ИОС № 2 (рис. 2).

Оценку степени негерметичности исследуемых объектов проводили с помощью гелиевого течеискателя (Pfeiffer Vacuum, Германия) по величине стационарного потока контрольного газа, регистрируемого течеискателем при перепаде давления контрольного газа, равном атмосферному давлению, методами гелиевого чехла (ГЧ), камеры давления (гелиевой камеры (ГК)) и вакуумной камеры (ВК). Контрольный газ — гелий марки А.

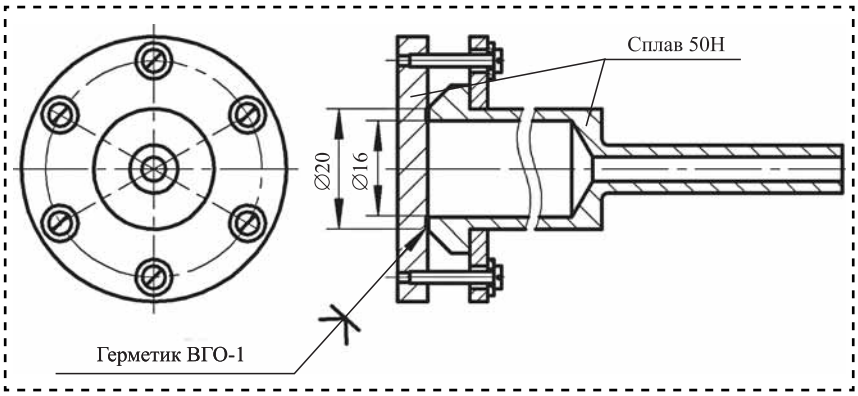


Рис. 1. Макет соединения сплав 50Н — герметик ВГО-1 — сплав 50Н

При исследовании методом ГЧ объект помещали в мягкий чехол (полиэтиленовый мешок) и соединяли с течеискателем; контрольный газ подавали в чехол.

Испытания методами ГК и ВК проводили в соответствии со схемами, приведенными на рис. 3. Откачку и заполнение испытательной

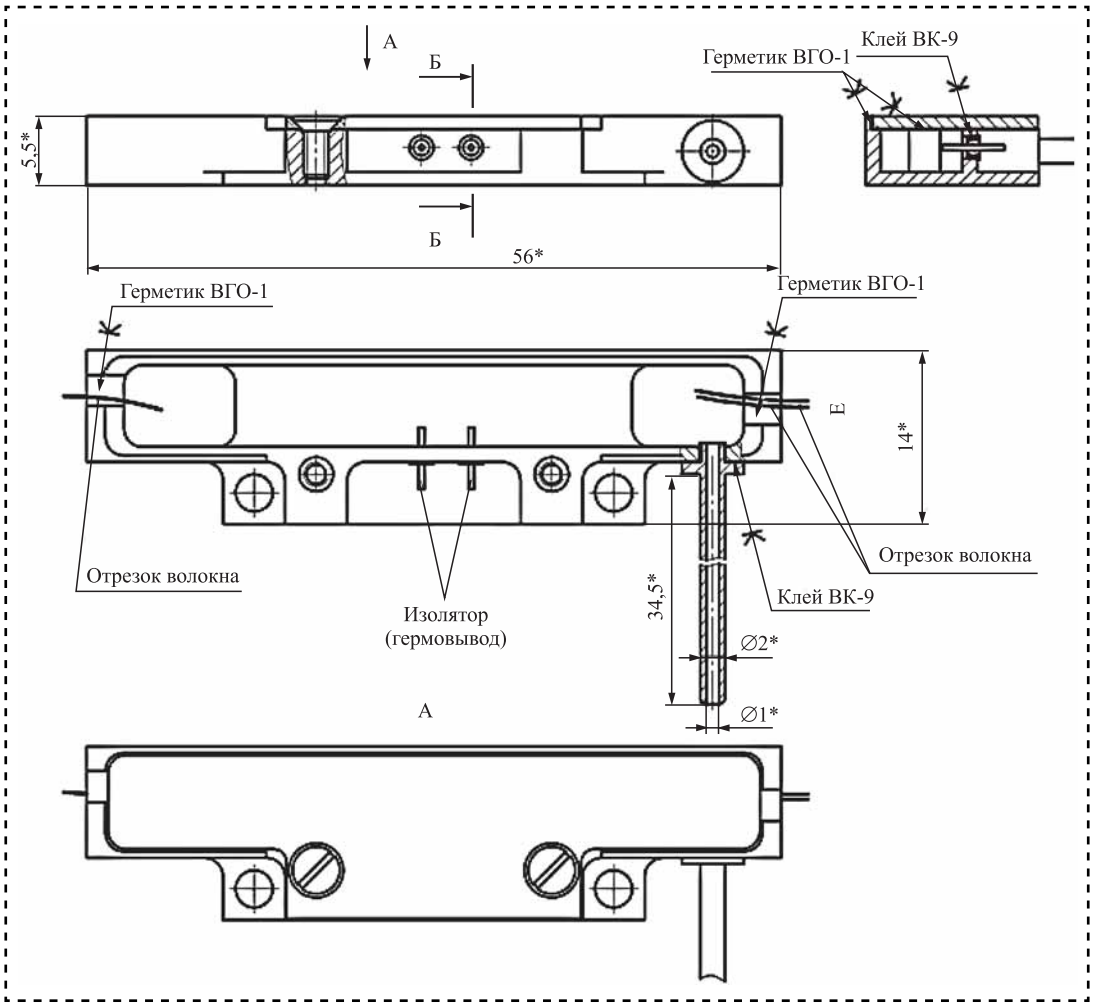


Рис. 2. Корпус ИОС

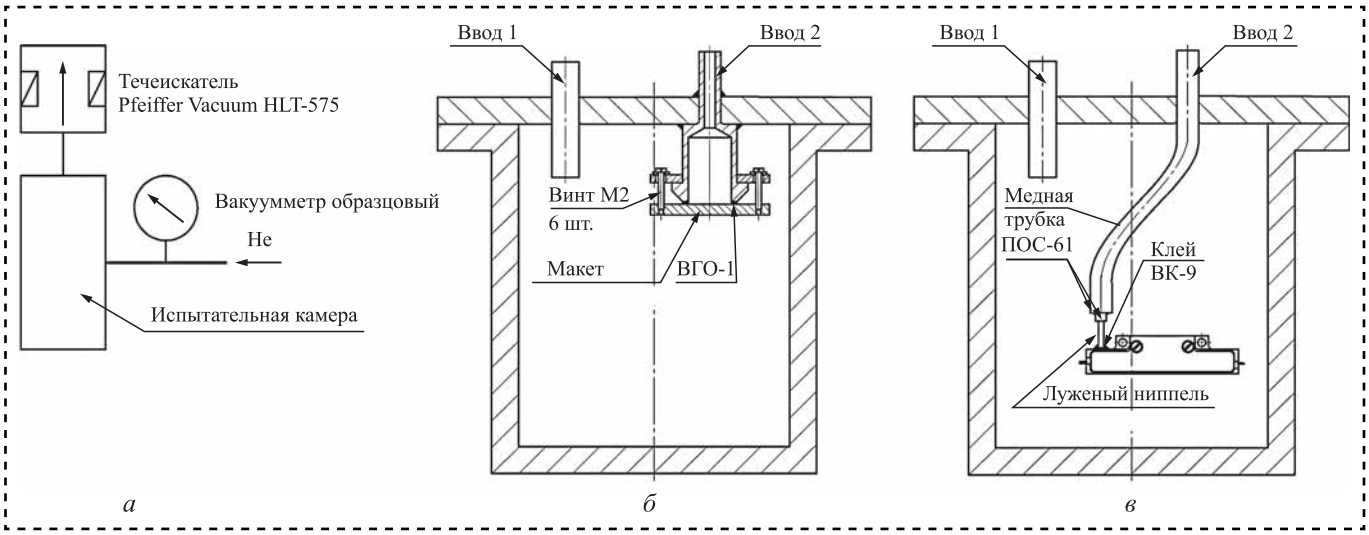


Рис. 3. Схемы соединений:
а — аппаратуры при оценке степени негерметичности объектов; *б* — макета ФС № 1 в испытательной камере; *в* — ИОС в испытательной камере

камеры (метод ГК) или исследуемого объекта (метод ВК) контрольным газом до атмосферного давления проводили через линию с вакуумметром. При этом течеискатель подсоединяли к исследуемому объекту (рис. 3, *б*, *в*, ввод 2; метод ГК) или к испытательной камере (рис. 3, *б*, *в*, ввод 1; метод ВК).

Предварительную проверку герметичности объектов и поиск места течи осуществляли методом обдува контрольным газом.

ИОС № 1 заполняли гелием и герметизировали по медному ниппелю холодной сваркой. Откачку и заполнение осушенным гелием до атмосферного давления осуществляли на специальной лабораторной установке.

На место холодной сварки наносят припой ПОС 61 с хлористым цинком.

Проверку герметичности ИОС № 1 после заполнения гелием и герметизации медного ниппеля проводили в специальной вакуумной камере со стеклянным колпаком, подсоединенной к течеискателю. Предварительно измерен фон камеры с незаполненным ИОС — $8{,}97 \cdot 10^{-10}$ л·торр/с.

Объекты исследования подвергали циклическим термовоздействиям при граничных температурах −50 и +50 °С: три цикла с выдержкой при −50 °С в течение 60 мин и при +50 °С в течение 120 мин (ТЦ-1) и два цикла с выдержкой при −50 °С в течение 6 ч и при +50 °С в течение 6 ч (ТЦ-2).

ИОС № 1 подвергали термоциклированию после заполнения гелием и герметизации ниппеля, макет и ИОС № 2 не заполняли и не герметизировали.

ИК-спектры образцов герметика ВГО-1 снимали с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Nicolet iS10.

Оценку степени негерметичности методами ГЧ, ГК и ВК соединения сплав 50Н—ВГО-1—сплав 50Н в макете ФС № 1 проводили при исходной нагрузке на слой герметика, создаваемой винтами при его формировании, в состоянии без нагрузки (без винтов) и после повторной установки и затяжки винтов с максимальной силой.

После испытаний макет разбирали для замеров слоя ВГО-1: наружный диаметр кольцевого слоя — 19,79...20,0 мм, внутренний диаметр — 16,0...16,1 мм; ширина кольцевого слоя — 1,82...2,0 мм. Толщину слоя измерить не удалось ввиду ее малости (на уровне микронеровностей поверхности макета), соответственно не удалось рассчитать удельную проницаемость материала.

Макет заново собрали (слой ВГО-1 заново сформирован и отвержден) и испытали на герметичность до и после термовоздействия, а также после хранения на воздухе при комнатной температуре (табл. 1).

Степень герметичности макета сильно зависит от степени сжатия слоя герметика ВГО-1. В свободном состоянии (без винтов) проницаемость герметика увеличивается на порядок и более, при максимальной силе затяжки винтов степень негерметичности макета уменьшается.

Таблица 1

Результаты испытаний макета

Метод испытаний	Поток гелия, регистрируемый течеискателем, $Q \cdot 10^8$, л·торр/с		
	Исходная затяжка	Без винтов	Максимальная затяжка
Гелиевого чехла	2,39	45,8	0,44
Гелиевой камеры	—	22,1	0,42
Переборка макета			
Гелиевой камеры	1,78	—	—
Вакуумной камеры	1,65	—	—
Термовоздействие ТЦ-2			
Гелиевой камеры	1,62	—	—
Вакуумной камеры	1,50	—	—
Выдержка на воздухе 22 дня			
Вакуумной камеры	1,57	—	—
Выдержка на воздухе 5 дней			
Вакуумной камеры	1,43	—	—

После переборки степень негерметичности макета осталась примерно на том же уровне, а также существенно не изменилась (не ухудшилась) после термовоздействия и хранения макета на воздухе при комнатной температуре.

ИОС № 2 подвергали испытаниям на герметичность методом ГЧ, ИОС № 1 — методами ГЧ, ГК и ВК. Испытания проводили до и после термовоздействий (ТЦ-1, ТЦ-2). ИОС № 2 подвергали термовоздействиям (ТЦ-1, ТЦ-2) в исходном состоянии (с открытым ниппелем). ИОС № 1 подвергали термовоздействию (ТЦ-1) после заполнения гелием и герметизации ниппеля.

Поток гелия из заполненного и загерметизированного ИОС № 1 измеряли в вакуумной камере со стеклянным колпаком (рис. 4, *а*). Снижение регистрируемого потока гелия со временем объясняется снижением давления гелия в ИОС за счет утечки при хранении ИОС на воздухе в процессе испытаний. Расчетное давление гелия в ИОС через 356 ч после его заполнения составляет 20,5 мм рт. ст. Полученная экспериментальная кривая совпадает с расчетной кривой, построенной в предположении о сохранении исходной степени негерметичности ИОС при данных испытаниях. Степень негерметичности ИОС в процессе данных испытаний (в течение 15 дней) существенно не изменилась. После термовоздействия поток гелия из ИОС снизился до уровня фона, что свидетельствует об отсутствии гелия в ИОС (рис. 4, *б*). Последние две точки получены после термовоздействия, они выпадают из общей линейной зависимости, что свидетельствует об увеличении степени негерметичности ИОС после термовоздействия.

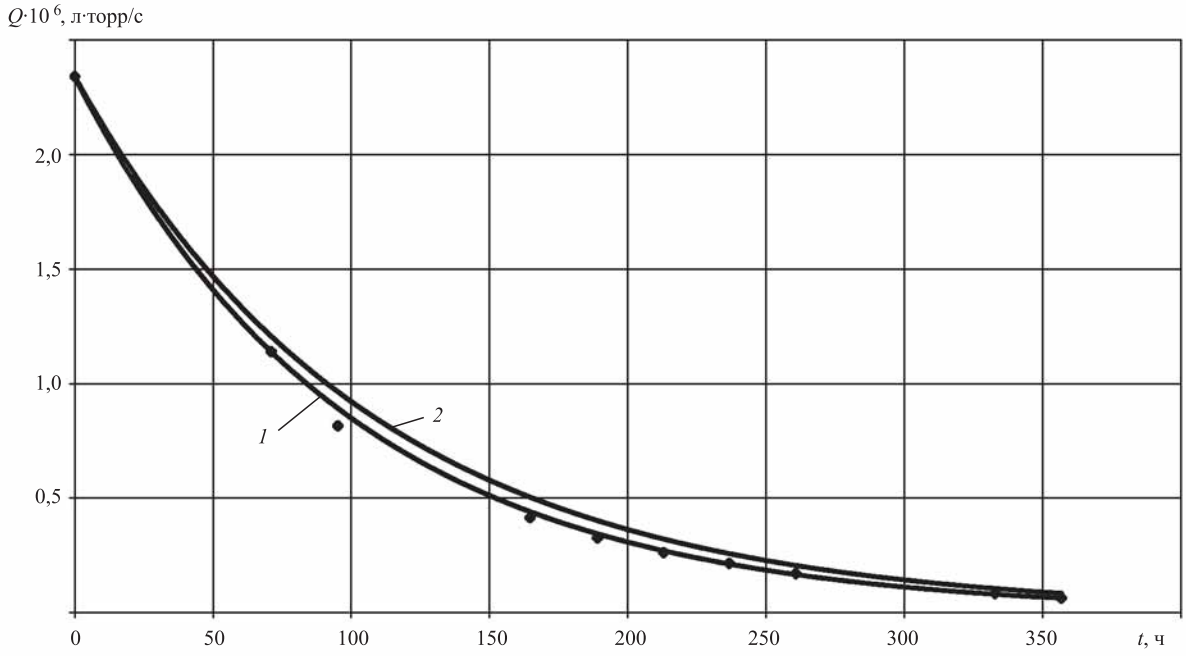
ИОС № 1 и ИОС № 2 в исходном состоянии имеют примерно одинаковую степень негерметичности. Таким образом, полученные оценки можно считать характерными для конструкции ИОС (табл. 2).

Сравнение данных, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что степень негерметичности ИОС на 2 порядка превышает степень негерметичности макета. Это объясняется конструкцией ИОС. В отличие от макета, в котором достаточно широкий и тонкий слой ВГО-1

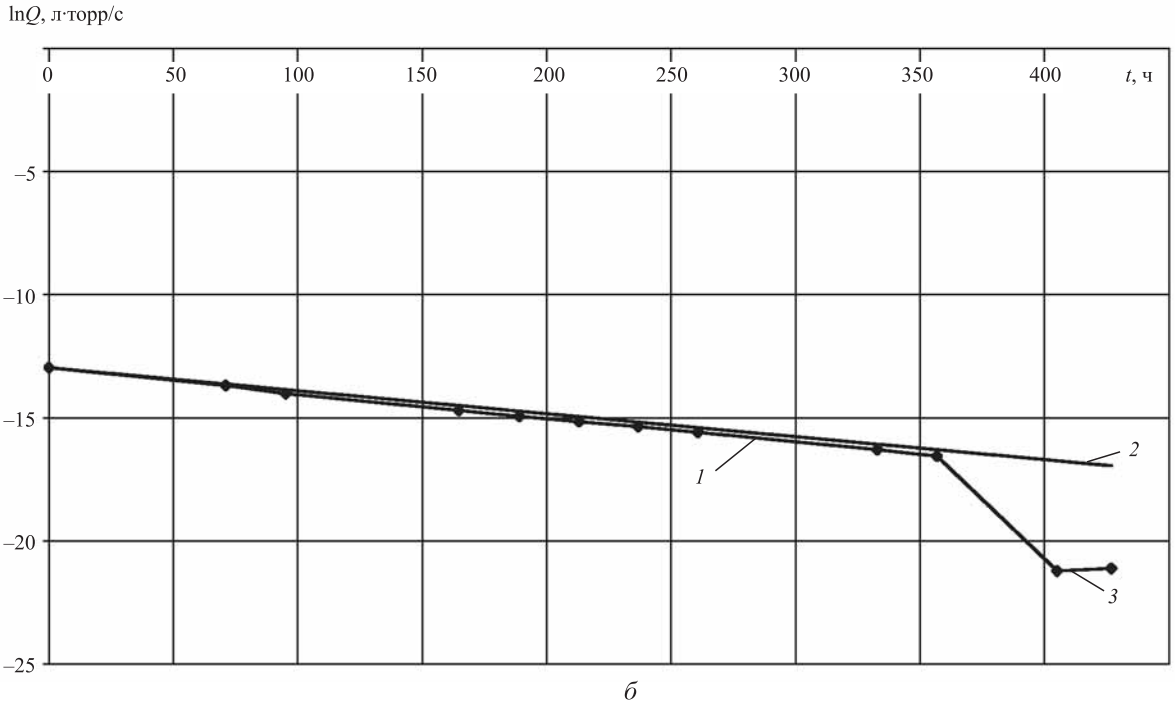
Таблица 2

Результаты испытаний ИОС

<table>
<tr><th colspan="2">ИОС № 1</th><th colspan="2">ИОС № 2</th></tr>
<tr><td>Метод испытаний</td><td>$Q \cdot 10^6$, л·торр/с</td><td>Метод испытаний</td><td>$Q \cdot 10^6$, л·торр/с</td></tr>
<tr><td>ГЧ</td><td>2,21</td><td>ГЧ</td><td>2,71</td></tr>
<tr><td colspan="2">Подпайка к трубке в камере; обнаружение течи; ремонт ниппеля</td><td colspan="2" rowspan="5">Выдержка на воздухе 25 дней</td></tr>
<tr><td>ГЧ</td><td>2,17</td></tr>
<tr><td>ГК</td><td>2,4</td></tr>
<tr><td>ВК</td><td>2,07</td></tr>
<tr><td colspan="2">Заполнение гелием, герметизация ниппеля</td></tr>
<tr><td>ВК</td><td>2,34</td><td colspan="2" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>ВК
10 замеров в течение 15 дней</td><td>~2,34
(см. рис. 4)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Термовоздействие ТЦ-1</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>ВК</td><td>Течь</td><td>ГЧ</td><td>5,41</td></tr>
<tr><td colspan="2">Вскрытие ниппеля</td><td colspan="2">Выдержка на воздухе 1 день</td></tr>
<tr><td>ГЧ</td><td>Течь ~2500</td><td>ГЧ</td><td>7,28</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="5"></td><td colspan="2">Выдержка на воздухе 10 дней</td></tr>
<tr><td>ГЧ</td><td>11,0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Термовоздействие ТЦ-2</td></tr>
<tr><td>ГЧ</td><td>53,0</td></tr>
</table>



а



б

Рис. 4. Зависимость от времени потока гелия из ИОС № 1:
а — до проведения ТЦ-1; *б* — до и после проведения ТЦ-1; *1* — результаты измерений; *2* — расчет; *3* — точки после термовоздействия

равномерно зажат шестью винтами, крышка ИОС прижата всего двумя винтами с одной стороны. Кроме того, в ИОС еще имеются места ввода световодов с довольно большой площадью сечения герметизирующего слоя ВГО-1.

Обе испытанных ИОС сохраняли герметичность до термовоздействий (ИОС № 2 в течение 25 дней хранения на воздухе при комнатной температуре). После ТЦ-1 в ИОС № 1 образовалась течь, степень негерметичности возросла на 3 порядка. Методом обдува ге-

лием локализовать место течи не удалось, течеискатель реагировал при обдуве ИОС с любой стороны. После ТЦ-1 степень негерметичности ИОС № 2 увеличилась примерно в два раза и продолжала расти при хранении ИОС на воздухе при комнатной температуре, а также после ТЦ-2. В итоге степень негерметичности увеличилась примерно в 20 раз. Таким образом, можно констатировать, что обе ИОС, в отличие от макета, не выдержали термоиспытаний.

Для выяснения возможных причин большей степени негерметичности ИОС по сравнению с макетом и их разгерметизации после термовоздействий провели исследование поведения герметика ВГО-1 при затвердевании с помощью ИК-спектроскопии.

Подготовили образцы герметика ВГО-1:

начальный (свежий) незатвердевший образец из тюбика — 1;

пленка затвердевшего герметика ВГО-1, образовавшаяся при фиксации винтами крышки макета, — 2;

объемный образец герметика ВГО-1, полученный естественным (воздушным) отверждением массы толщиной 2...3 мм на поверхности стеклянной пластинки в течение 48 ч при комнатной температуре на воздухе (влажность 50...60 %), — 3.

ИК-спектры в тонкой пленке материала получили с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Nicolet iS10. При съемке спектров локальные участки препаратов герметика наносили на ровную поверхность Ge-детектора диаметром 3 мм.

Полученные ИК-спектры имеют весьма характерный вид полимерных силоксановых материалов, где представлены хорошо выраженные полосы поглощения [2, 3].

На рис. 5, *а* представлены спектры образцов *1* и *2* в области частот, содержащей характерные полосы поглощения. Полоса в области 2900 $см^{-1}$ относится к валентным колебаниям С—Н фрагментов $Si—CH_3$, полоса в области 1400 и 1260 $см^{-1}$ — к деформационным колебаниям групп $—CH_3$, принадлежащих фрагментам $Si—CH_3$. Широкая бимодальная полоса 1020...1090 $см^{-1}$ относится к антисимметричным валентным колебаниям фрагментов силоксановой цепи —Si—O—Si—, резкая полоса в области 750...900 $см^{-1}$ относится к деформационным колебаниям групп $—CH_3$ из фрагментов $Si—CH_3$.

Существенным отличием спектров образцов *1* (незатвердевший герметик) и *2* (затвердевшая тоная пленка) является профиль широкой полосы 1020...1090 $см^{-1}$, которая относится к валентным колебаниям фрагментов силоксановой цепи —Si—O—Si—. Для затвердевшего (полимеризованного) образца *2* профиль полосы более размыт и выражены "крылья" в области как меньших, так и больших частот.

Указанное различие в профиле полосы может иметь структурную интерпретацию. Так, в затвердевшем состоянии, поперечные мостики, создающие трехмерную структуру, накладывают дополнительные пространственные локальные и хаотические ограничения для колебаний цепей —Si—O—Si—, что проявляется в менее характеристичном и размытом по энергиям спектре. В жидком же состоянии образца *1* спектральная полоса более характеристична (имеет особенности) и сужена по интервалу энергий (частот). Таким образом, в данном случае затвердевания герметика ВГО-1 профиль полосы структурно чуствителен и эта характеристика может быть использована для определения степени затвердевания.

На рис. 5, *б* представлены спектры трех разных участков объемного образца *3* герметика ВГО-1. При общем совпадении спектральных полос имеет место существенное отличие профиля структурно-чувствительной полосы 1020...1090 $см^{-1}$ для разных участков массива герметика. Подобные особенности спектров указывают на разную степень затвердевания герметика в толще материала без непосредственного контакта с атмосферной влагой.

Полученные по результатам моделирования процесса затвердевания герметика ВГО-1 в относительно толстых слоях данные ИК-спектроскопического исследования показывают, что:

— профиль полосы поглощения ИК-спектра в области 1020...1090 $см^{-1}$ структурно чувствителен к степени образования трехмерно-связанной структуры основы герметика — силоксана;

— при затвердевании материала в относительно толстом слое (2...3 мм) через 48 ч после начала процесса при комнатной температуре на воздухе (50...60 % влажности) материал внутри слоя структурно неоднороден — различается степенью трехмерного связывания силоксанового каркаса.

Таким образом, по данным ИК-спектроскопии степень "сшивки" отвержденного ВГО-1 уменьшается по мере удаления от поверхности образца. В толстых слоях герметика (таких, как в местах ввода оптического волокна в корпус ИОС)

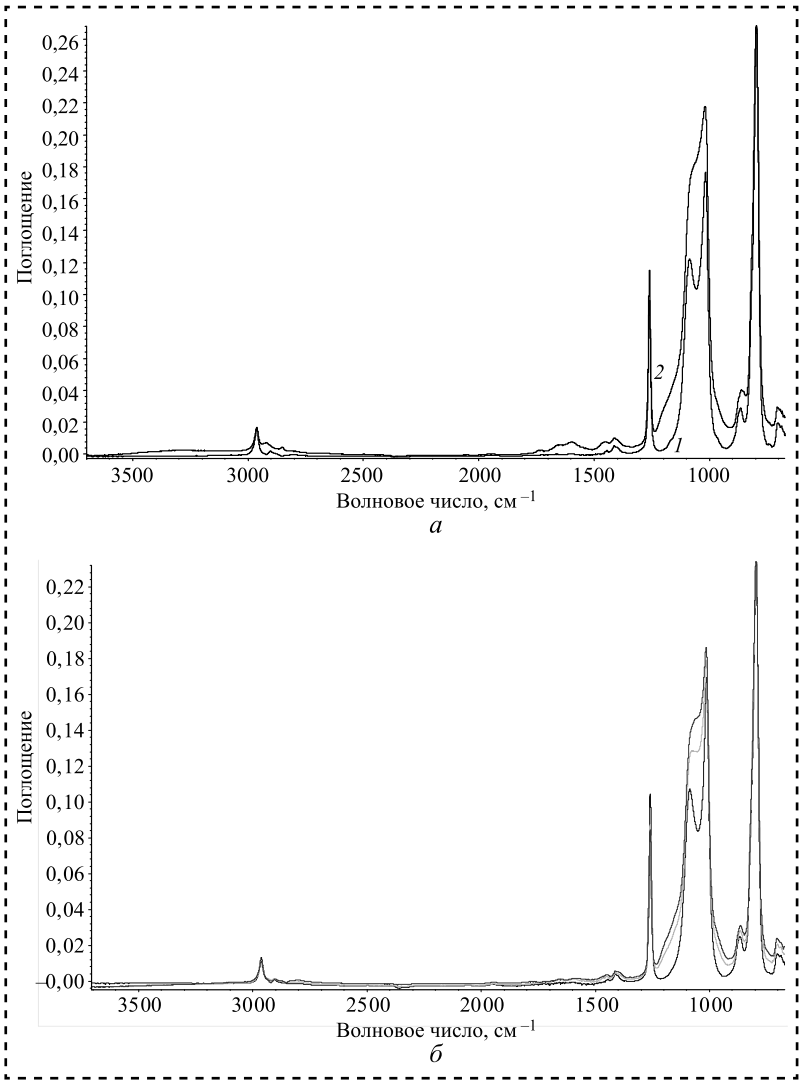


Рис. 5. ИК-спектры в тонкой пленке:
а — образца *1* (незатвердевший ВГО-1) и образца *2* (пленка затвердевшего герметика ВГО-1); *б* — образца *3* (объемный образец герметика ВГО-1, различные участки внутри объема)

отверждение материала в глубине может быть неполным, что скажется на проницаемости материала и устойчивости его к термовоздействиям.

Выводы

Степень негерметичности соединения сплав 50Н — герметик ВГО-1 — сплав 50Н в макете оценена на уровне $(1{,}4...2{,}4)\cdot10^{-8}$ л·торр/с, она сильно зависит от степени сжатия слоя герметика и изменяется в пределах двух порядков от $4{,}6\cdot10^{-7}$ л·торр/с (без винтов) до $4{,}20\cdot10^{-9}$ л·торр/с (при дополнительной подтяжке винтов).

Степень негерметичности ИОС оценена на уровне $(2{,}1...2{,}7)\cdot10^{-6}$ л·торр/с, что на два порядка хуже степени негерметичности соединения сплав 50Н — герметик ВГО-1 — сплав 50Н в макете.

В ИК-спектрах герметика ВГО-1 обнаружена структурно-чувствительная полоса в области 1020...1090 см$^{-1}$, по профилю которой можно судить о степени отверждения герметика.

Выявлено уменьшение степени сшивки отвержденного ВГО-1 по мере удаления от поверхности образца. Неполное отверждение ВГО-1 в глубине герметизирующего слоя может сказываться на его проницаемости и устойчивости к термовоздействиям.

Заключение

В соединениях, герметизируемых ВГО-1, рекомендуется минимизировать площадь поперечного сечения (толщину) герметизирующего слоя, а под нагрузкой (например, при затяжке герметизирующего слоя винтами) равномерно распределять нагрузку (винты должны располагаться равномерно по периметру герметизируемого соединения).

Герметичность соединений с ВГО-1 может быть повышена дополнительной подтяжкой винтов после формирования слоя герметика, поэтому при использовании ВГО-1 в качестве материала для герметизации конструкции слой ВГО-1 необходимо сжимать механически.

Степень сшивки (отверждения) герметика ВГО-1 можно контролировать по профилю структурно-чувствительной ИК-полосы поглощения в области 1020...1090 см$^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям фрагментов силоксановой цепи —Si—O—Si—.

В конструкциях, требующих высокой степени герметичности, следует минимизировать применение клеевых соединений и применять только в тех местах конструкции, где без них нельзя обойтись.

Библиографический список

1. **Герметик** ВГО-1: ТУ38.303-04-04—90.
2. **Тарасевич Б.Н.** ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: МГУ, 2012.
3. **Larkin P.** Infrared and raman spectroscopy: principles and spectral interpretation. Elsevier Inc., 2011. 228 p.

УДК 621.774

К.С. Мищенко, М.Ю. Захарченко
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.)
E-mail: kristina.neigebauer@yandex.ru

Исследование способа формирования локальных дорожек качения шариковой раскаткой с обеспечением повышенной статической грузоподъемности

Рассмотрен механизм шариковой раскатки колец шариковых подшипников. Установлены закономерности распределения внешней комбинированной нагрузки между шариками. Предложена математическая модель процесса раскатки, позволяющая установить соотношение между нагрузкой на шарики и действующими факторами, в том числе углом контакта шариков с дорожкой качения и соотношением радиальной и осевой внешних нагрузок.

The article describes a mechanism for ball rolling of rings in ball bearings. The auhors define distribution regularities of the external load combination between the balls. The suggested mathematical model for the rolling process allows for the establishment of the relationship between the load over the balls and the operating factors, including the contact angle of the balls with the raceway, and ratio of the radial and axial external loads.

Ключевые слова: подшипник, шариковая раскатка, деформация колец, дорожка качения.

Keywords: bearing, ball reeling, ring deformation, raceway.

Цель работы — повышение статической грузоподъемности шариковых подшипников на основе совершенствования и исследования способа формирования локальных дорожек качения шариковой раскаткой.

Работы ряда авторов, таких как R. Stribeck, Д.Н. Решетова, М.П. Белянчикова, E. Meldau и др., посвящены определению распределения нагрузки между телами качения, так как оно оказывает существенное влияние не только на процесс раскатки, но и на грузоподъемность и долговечность подшипников. К сожалению, достаточно точного решения не было получено, и в настоящее время эти нагрузки определяют по эмпирическим коэффициентам. Поэтому исследование механизма распределения внешней нагрузки между шариками важно для повышения эффективности процесса шариковой раскатки.

На рис. 1 показана схема шариковой раскатки, позволяющая осуществлять раскатку дорожек качения как радиально-упорных, так и упорно-радиальных шариковых подшипников. Раскатку дорожки качения кольца *2* шарикового подшипника осуществляют раскатником, состоящим из набора шариков *1* с числом *z* и оправки *3*, прижимающей шарики к обрабатываемой поверхности под углом контакта β. На оправку действует внешняя нагрузка *P*, направленная

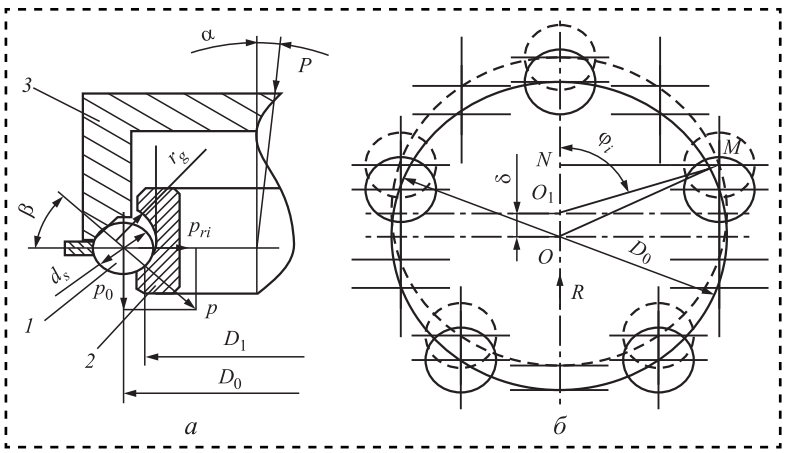


Рис. 1. Схема шариковой раскатки:
а — поперечное сечение; *б* — вид в плане

в центр симметрии расположения шариков под углом α к оси вращения кольца *1*. Определим распределение нагрузки *P* между шариками.

Примем следующие допущения:

1. Деформация колец под действием внешней нагрузки пренебрежимо мала по сравнению с локальной деформацией тел и дорожки качения.

2. Осевая нагрузка на подшипник превышает радиальную нагрузку и обеспечивает непрерывный контакт всех тел качения с дорожками качения так, что осевой и радиальный зазоры между обрабатываемой поверхностью, поверхностью оправки и шариками отсутствуют.

3. Разноразмерностью шариков пренебрегаем, так как их точность на порядок выше точности колец.

4. Угол контакта тел и дорожки качения в подшипнике постоянный и пренебрежимо мало зависит от деформации тел и дорожки качения.

Обозначим нагрузку на шарик, действующую вдоль линии контакта с дорожкой качения — p_i, осевую нагрузку, действующую вдоль оси кольца — p_{oi}, а радиальную нагрузку — p_{ri}. Рассмотрим распределение этих сил, возникающих от действия внешней нагрузки *P*, между шариками. Внешнюю нагрузку *P*, действующую под углом α к оси вращения кольца подшипника, разложим на две составляющие: осевую $A = P\cos\alpha$ и радиальную *R*, равную $R = P\sin\alpha$. Момент силы *P* относительно центра симметрии шариков равен нулю, так как она направлена в этот центр.

Отличие методики расчета распределения нагрузки между шариками от существующих (М.П. Белянчиков и др.) состоит в том, что нагрузка на шарики определяется не простым разложением составляющих внешней нагрузки, а по величине упругой деформации шариков с дорожкой качения:

$$p_i = p_0\left(\frac{\delta_{r0R}\cos\varphi + \delta_{riA}}{Kg\cos\beta}\right)^{\frac{3}{2}} = p_0\left(\frac{c\cos\varphi_i + 1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}};$$

$$p_{ri} = p_{r0}\left(\frac{c\cos\varphi_i + 1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}}; \qquad (1)$$

$$p_{oi} = p_{o0}\left(\frac{c\cos\varphi_i + 1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}},$$

где $c = \delta_{r0R}/\delta_{rA}$;

φ_i — угол расположения *i*-го шарика относительно направления радиальной нагрузки;

β — угол контакта шариков и дорожек качения;

K_g — коэффициент пропорциональности между деформацией и нагрузкой на шарик;

δ_{r0R} — составляющая деформация наиболее нагруженного шарика в радиальном направлении, возникающая от внешней радиальной нагрузки *R*;

δ_{rA} — составляющая деформации шарика в радиальном направлении, возникающая от внешней осевой нагрузки *A*;

p_{r0} и p_{o0} — радиальная и осевая составляющие максимальной нагрузки p_0 на шарик соответственно.

После операции суммирования равенств (1) по всем шарикам определим:

$$R = p_{r0}\sum_{i=0}^{z-1}\left(\frac{c\cos\left(\varphi_0 + i\frac{2\pi}{z}\right)+1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}} \times \cos\left(\varphi_0 + i\frac{2\pi}{z}\right); \qquad (2)$$

$$A = p_{o0}\sum_{i=0}^{z-1}\left(\frac{c\cos\left(\varphi_0 + i\frac{2\pi}{z}\right)+1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}},$$

где *z* — число раскатных шариков;

φ_0 — угол расположения наиболее нагруженного шарика; $0 \leqslant \varphi_0 \leqslant \pi/z$.

Обозначим:

$$m_r = \frac{1}{z}\sum_{i=0}^{z_a-1}\left(\frac{c\cos\left(\varphi_0 + i\frac{2\pi}{z}\right)+1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}} \times \cos\left(\varphi_0 + i\frac{2\pi}{z}\right); \qquad (3)$$

$$m_a = \frac{1}{z}\sum_{i=0}^{z_a-1}\left(\frac{c\cos\left(\varphi_0 + i\frac{2\pi}{z}\right)+1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}}.$$

Разделив равенства (2) друг на друга и учитывая обозначения (3), получим:

$$\frac{m_r}{m_a} = \frac{R\sin\beta}{A\cos\beta} = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta. \qquad (4)$$

Решение поставленной задачи зависит от возможности определения величины *c*. Так как эта величина зависит от m_r/m_a в неявном виде, решение осуществляется численными

методами. Для этого разработана программа расчета.

По формулам (3) определяем значения m_r и m_a и находим максимальную нагрузку на шарики p_0 и распределение нагрузки p_i между шариками:

$$p_0 = \frac{P}{z}\sqrt{\frac{\sin^2\alpha}{m_r^2}+\frac{\cos^2\alpha}{m_a^2}};$$
$$p_i = p_0\left(\frac{c\cos\varphi_i + 1}{c+1}\right)^{\frac{3}{2}}. \quad (5)$$

При $z \geqslant 5$ число шариков не оказывает значительного влияния на значение c, m_r и m_a, а также на колебание величины максимальной нагрузки на шарик p_0 при его перемещении в пределах угла $0 \leqslant \varphi_0 \leqslant \pi/z$. Но при $z < 5$ максимальная нагрузка на шарик при его перемещении в пределах угла $0 \leqslant \varphi_0 \leqslant \pi/z$ существенно изменяется, что может вызвать вибрации в подшипнике.

На основе определения характера распределения нагрузки между шариками разработан способ шариковой раскатки дорожек качения упорно-радиальных подшипников [Пат. № 2583510. Способ стабилизации параметров колец шарикоподшипников. 13.04.2016] (рис. 2). Для раскатки верхнее *1* и нижнее *2* кольца упорно-радиального подшипника собирают с шариками *3*, разделенными сепаратором *4*. Дорожки качения колец *1* и *2* имеют круговую форму профиля с радиусами r_{g1} и r_{g2}. Твердость шариков *3* на 5...8 единиц HRC выше твердости колец *1* и *2* подшипника. Всего шариков *3* — четыре. Диаметр шариков d_s равен диаметру шариков в собранном шарикоподшипнике. Диаметры по дну дорожек качения D_1 и D_2 у колец *1* и *2* различные, поэтому между шариками *3* и дорожками качения колец *1* и *2* подшипника устанавливают угол контакта $\beta \neq 0$.

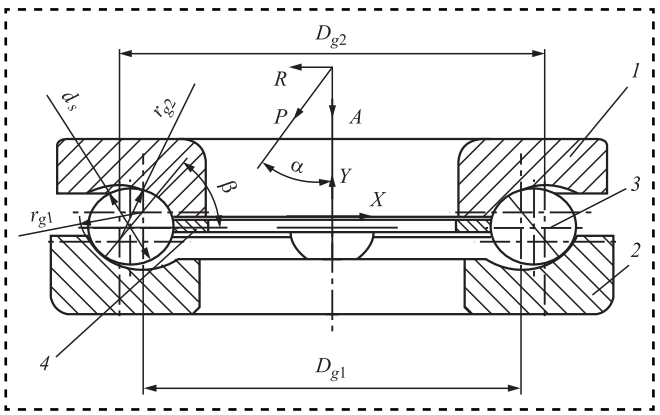


Рис. 2. Схема шариковой раскатки упорно-радиального шарикового подшипника в собранном виде

Подшипник устанавливают на оправке (на рис. 2 не показана), имеющей привод вращения. К верхнему кольцу *1* подшипника прикладывают внешнюю нагрузку *P*, направленную под углом α к оси вращения подшипника. Угол действия нагрузки определяют из равенства:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{R}{A},$$

где A и R — осевая и радиальная составляющие внешней нагрузки на подшипник, действующие в процессе эксплуатации, соответственно.

Нижнему кольцу *1* подшипника придают вращение с частотой n_2. После раскатки дорожки качения нижнего кольца подшипник переворачивают на 180° так, что верхнее кольцо располагается снизу, и осуществляется раскатка верхнего кольца. Способ можно осуществлять при $\alpha = 0$. При этом требуется более значительная внешняя нагрузка, но в этом случае оба кольца могут вращаться одновременно в разные стороны.

Внешнюю нагрузку *P* определяют из условия, что шарики воздействуют на дорожки качения с силой, вызывающей пластическую деформацию поверхности дорожек:

$$P_r = \frac{P p_r z_r}{p_0 z}, \quad (6)$$

где P — рабочая нагрузка на подшипник, $P = \sqrt{A^2 + R^2}$, Н;

p_0 — максимальная рабочая нагрузка на шарики, определяемая равенством (5), Н;

z — число шариков в шарикоподшипнике;

z_r — число раскатных шариков;

p_r — максимальная нагрузка на шарики в процессе раскатки,

$$P_r = \frac{\pi \mathrm{HB}^2 \eta b_l d_s D_1}{2(d_s + D_1)}, \quad (7)$$

где $\eta = \left(1 - m_1^2\right)/E_1 + \left(1 - m_2^2\right)/E_2$;

m_1 и m_2 — коэффициенты Пуассона материала шариков и колец подшипника;

E_1 и E_2 — модули упругости материала шариков и колец подшипника, МПа;

d_s — диаметр шариков, мм.

После процесса раскатки подшипник разбирают, затем собирают вновь с установкой полного комплекта шариков, предусмотренных конструкторской документацией.

Допустимая нагрузка на подшипник, при которой на дорожке качения останется след пластической деформации от наиболее нагруженного шарика, и является статической грузоподъемностью подшипника:

$$C = \frac{p_r z}{\sqrt{\frac{\cos^2 \alpha}{m_r} + \frac{\sin^2 \alpha}{m_a}}}. \quad (8)$$

Заключение

Статическая грузоподъемность подшипника после предложенного способа раскатки возрастает более чем на 80 % по сравнению со стандартным подшипником. Особенно это важно для тихоходных подшипников, работающих в условиях ударной нагрузки, типа 1118-2902840, устанавливаемых в верхних опорах передней подвески автомобилей.

Библиографический список

1. **Королев А.А.** Математическое моделирование упругих тел сложной формы. Саратов: СГТУ, 2001. 128 с.

2. **Королев А.В., Королев Ан.А., Королев Ал.А.** Совершенствование технологии изготовления тонкостенных колец подшипников. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.

3. **Королев А.В., Королев Ан.А.** Точная холодная торцовая раскатка. Саратов: СГТУ, 2003. 142 с.

4. **Пат. РФ 2222392**, МПК[8] B 21 B 19/06. Способ раскатки деталей / В.Б. Годунов, А.А. Королев, А.А. Королев; заявл. 04.06.2002; опубл. 27.01.2004.

5. **Королев А.В., Воробьев Р.В.** Новая прогрессивная технология получения сложнопрофильных заготовок колец подшипников из трубного проката // Состояние и перспективы развития электротехнологии (X Бернардовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. Иваново: 2001. С. 221.

6. **Королев А.В., Воробьев Р.В.** Прогрессивная технология получения кольцевых заготовок из трубного проката // Вестник инженерной Академии Украины. КВ № 2635. № 3. 2001. Ч. 1. С. 211—214.

7. **Королев А.В., Воробьев Р.В.** Математическое моделирование процесса холодной раскатки // Динамика технологических систем: тр. V1 Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2001. С. 55—59.

8. **Пат. РФ 2094158**, МПК[8] B 21 H 1/02, B 21 D 37/12. Устройство для раскатки деталей // А.В. Королев, П.Ф. Полстьянов, В.А. Козин, В.Р. Атоян; заявл. 19.03.1996; опубл. 27.10.1997.

9. **Королев А.В., Ефимов С.А., Меркулов А.А.** Технология окончательной обработки дорожек качения подшипников // Современные материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч. конф. Курск: 2013.

10. **Королев А.В., Нейгебауэр К.С., Мухина Е.В.** Момент сопротивления вращению упорно-радиального подшипника // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2013. С. 161—165.

11. **Королев А.В., Филимонов Е.В., Болкунов В.В., Королев А.А.** Безотходная технология изготовления деталей типа фасонных валиков // Вестник машиностроения. 2009. № 12. С. 74—76.

12. **Спришевский А.И.** Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1969. 349 с.

УДК 621.5

Б.М. Эрлих, *канд. техн. наук*
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: uliaerlich@mail.ru

Методика активного возбуждения колебаний с характеристиками сложного типа в машинах и механизмах

Определены оптимальные законы силового и параметрического воздействия при наличии сложной структуры функции нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил, при наличии одновременно двух источников внешних возмущений и при несовпадении собственной частоты колебаний и частоты силового и параметрического воздействия при решении задачи управляемого возбуждения с заданной частотой автоколебаний, обеспечивающей возрастание амплитуды колебаний. Путем введения расширенного параметрического возбуждения показана возможность обеспечения стабилизации режимов в случае их неустойчивости.

With the functioning of mechanical systems for various purposes, the problem of controlled excitation with a given frequency of self-oscillations arises, which ensures an increase in the amplitude of the oscillations. The optimal laws of parametric and force impact are determined in the presence of a complex structure of the function of the nonlinear components of the elastic and dissipative forces, in the presence of simultaneously two sources of external perturbations and at non-coincidence of the natural frequency of oscillations and the frequency of the parametric and force impact. By introducing an extended parametric excitation, it has been shown that it is possible to stabilize the regimes in the case of their instability.

Ключевые слова: активное возбуждение колебаний, параметрическое воздействие, силовое воздействие, интегральная интенсивность воздействия, функция упругой и диссипативной сил, неустойчивость колебаний, расширенное параметрическое возбуждение, стабилизация режимов неустойчивости колебаний.

Keywords: active excitation of oscillations, parametric influence, force impact, integral intensity of action, elastic and dissipative force function, instability of oscillations, extended parametric excitation, stabilization of oscillations instability regimes.

Рассмотрим методику активного возбуждения фрикционных колебаний с различными наборами характеристик при использовании силового и параметрического воздействия [1—4]. Уравнение динамики для таких систем имеет общий вид:

$$\ddot{x} + \omega_0^2\left(1 + h\cos\left(2\omega_0 t\right) + \nu\left(x,\, \dot{x}\right)\right)x + f\left(x,\, \dot{x}\right) = \\ = B\sin\left(\omega_0 t\right) + u\left(x,\, \dot{x}\right), \qquad (1)$$

где $\omega_0^2 x$ — линейная составляющая упругой силы;

$h\cos(2\omega_0 t)$ — периодическое параметрическое возмущение;

h — амплитуда;

$2\omega_0$ — частота (половинная частота возмущения, близка к собственной частоте ω_0);

$B\sin(\omega_0 t)$ — внешняя гармоническая возмущающая сила;

$f\left(x,\, \dot{x}\right)$ — функция линейной и нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил;

$u\left(x,\, \dot{x}\right)$ — закон силового воздействия с частотой ω;

$\nu\left(x,\, \dot{x}\right)$ — закон параметрического воздействия с частотой ω.

В общем случае зависимость автоколебательной характеристики $f\left(x,\, \dot{x}\right)$ имеет сколь угодно сложную структуру. Для широких классов нелинейностей функция $f\left(x,\, \dot{x}\right)$

зависит только от скорости. Поэтому используем в качестве функции $f(x, \dot{x})$ следующее выражение:

$$f(\dot{x}) = k_1 \dot{x}\,\mathrm{abs}(\dot{x}) - k_2 \mathrm{sign}(\dot{x}) + 2k_3\dot{x} + k_4\dot{x}^3. \quad (2)$$

Эта функция аппроксимирует довольно широкий спектр вариантов функции $f(\dot{x})$, что позволяет в реальных задачах определять параметры $k_1 ... k_4$.

Для возбуждения автоколебаний рассмотрим системы, описываемые дифференциальными уравнениями:

— при силовом воздействии

$$\ddot{x} + \omega_0^2\left(1 + h\cos(2\omega_0 t)\right)x + k_1\dot{x}\,\mathrm{abs}(\dot{x}) - k_2\mathrm{sign}(\dot{x}) + 2k_3\dot{x} + k_4\dot{x}^3 = B\sin(\omega_0 t) + u(x, \dot{x}); \quad (3)$$

— при параметрическом воздействии

$$\ddot{x} + \omega_0^2\left(1 + h\cos(2\omega_0 t) + \nu(x, \dot{x})\right)x + k_1\dot{x}\,\mathrm{abs}(\dot{x}) - k_2\mathrm{sign}(\dot{x}) + 2k_3\dot{x} + k_4\dot{x}^3 = B\sin(\omega_0 t). \quad (4)$$

Законы силового и параметрического воздействий при заданной частоте ω, обеспечивающие возбуждение и гашение колебаний в системах со сложным набором характеристик, определяют по формулам:

$$u(x, \dot{x}) = \left(\omega_0^2 - \omega^2\right)x + \left(f_2(A) - \mathrm{fh}B\right)\dot{x}/\omega; \quad (5)$$

$$\nu(x, \dot{x}) = 2/\left(\omega_0^2 A^2\right) \times \left[\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)\left(\dot{x}^2/\omega^2 - x^2\right) - 2\left(f_2(A) - \mathrm{fh}B\right)x\dot{x}/\omega\right], \quad (6)$$

где $f_2(A)$ — коэффициент гармонической линеаризации функции $f(\dot{x})$ с дополнительным параметром A;

$\mathrm{fh}B$ — коэффициент гармонической линеаризации внешних возмущений.

Структуры использованных законов воздействия определены с применением методов линеаризации и теории оптимального управления.

Для функции $f(\dot{x})$ коэффициент гармонической линеаризации равен:

$$f_2(A) = 8k_1\omega^2 A/(3\pi) - 4k_2/(\pi A) + 2k_3\omega + 3k_4\omega^3 A^2/4. \quad (7)$$

Коэффициент гармонической линеаризации возмущающих сил $\mathrm{fh}B$ равен:

$$\mathrm{fh}B = \omega_0^2 h/2 + B/A. \quad (8)$$

В формулах (7), (8) A — подлежащий определению неизвестный дополнительный параметр.

Условия $\omega_0 = \omega$;

$$K(k_1, k_2, k_3, k_4, A) = f_2(A) - \mathrm{fh}B = 0 \quad (9)$$

позволяют определить параметр A^* отсутствия силового и параметрического воздействия, с которого нужно начинать поиск оптимального дополнительного параметра A для возбуждения или гашения колебаний.

Выбор дополнительного значения параметра $A > A^*$ обеспечивают увеличение амплитуды колебаний (т.е. возбуждение), выбор $A < A^*$ — уменьшение амплитуды колебаний (т.е. гашение).

Для расчета интегральной интенсивности силового воздействия $u(x, \dot{x})$ за время T используют формулу:

$$Iu = \int_0^T \left(u(x, \dot{x})\right)^2 dt,$$

а для расчета интегральной интенсивности параметрического воздействия $\nu(x, \dot{x})$ за время T —

$$I\nu = \int_0^T \left(\omega_0^2 \nu(x, \dot{x})\,x\right)^2 dt.$$

Эти формулы применяют для сравнительной оценки влияния различных параметров автоколебательных систем, параметров законов параметрического или силового воздействия на интенсивность их воздействия.

Методика обеспечивает активное возбуждение колебаний с более сложной структурой функции нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил при наличии одновременно двух источников внешних возмущений и при несовпадении собственной частоты колебаний и частоты силового или параметрического воздействия.

Для проверки работоспособности предлагаемой методики возбуждения колебаний со сложным набором характеристик выбраны варианты, где $\omega_0 = 1$ и коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 отличны от нуля:

$$k_1 = 0{,}1;\ k_2 = 0{,}3;\ k_3 = -0{,}5;\ k_4 = 0{,}5.$$

На рис. 1 приведены зависимости K решения уравнения (9) при варьировании одного

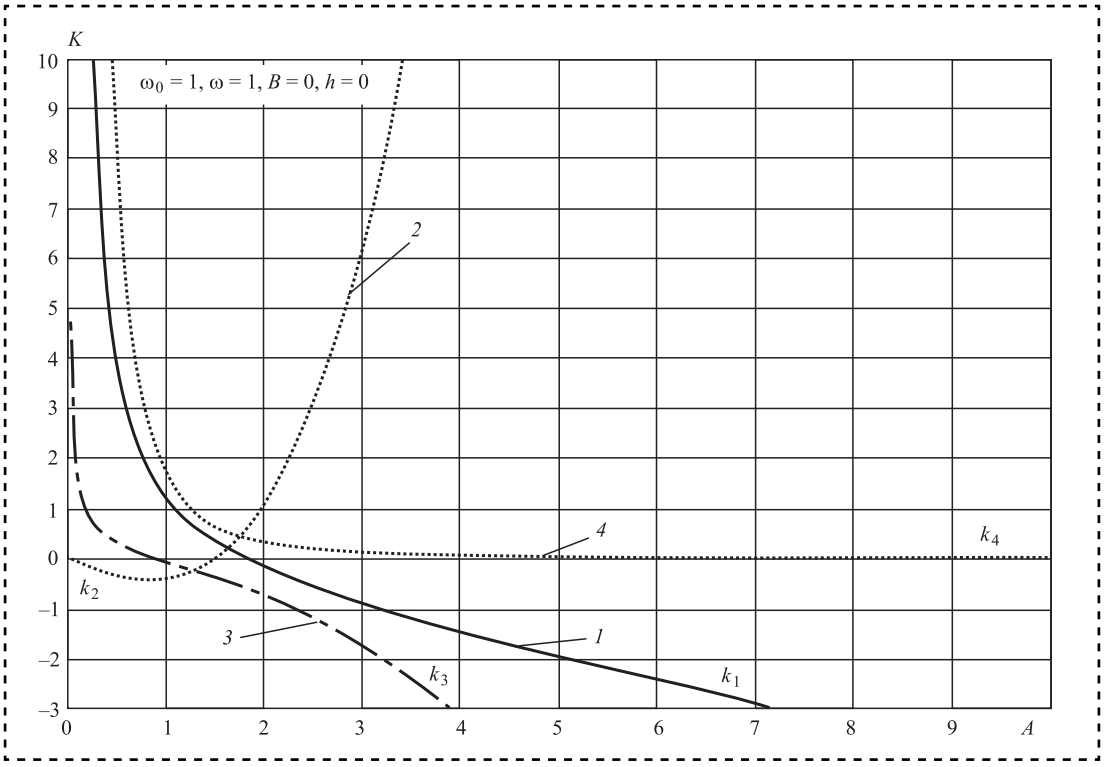


Рис. 1. Зависимости решения уравнения (9) $K(k_1, k_2, k_3, k_4, A) = 0$ при варьировании одного из параметров k_1—k_4 и фиксации остальных трех:
1 — $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$; *2* — $k_1 = 0{,}1$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$; *3* — $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_4 = 0{,}5$; *4* — $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$

из параметров k_1—k_4 и фиксации остальных трех, позволяющее определять параметр A^* отсутствия силового или параметрического воздействия. Принятым для расчета параметрам k_1—k_4 при отсутствии внешних возмущающих сил соответствует параметр $A^* = 1{,}7$, при котором отсутствует силовое и параметрическое воздействие.

На рис. 2 показаны зависимости от времени амплитуды колебаний $x(t)$ (рис. 2, *а*), закона силового воздействия $u(t)$ (рис. 2, *б*) и интегральной интенсивности воздействия $Iu(t)$ (рис. 2, *в*) при отсутствии периодических возмущений ($B = 0$, $h = 0$).

Параметры ω, A кривых *1* соответствуют случаю отсутствия силового воздействия. Кривые *2* описывают случай равенства частот $\omega_0 = \omega$ при $A = 2{,}5$, когда фактическая максимальная амплитуда возросла в 1,8 раза. Кривые *3* соответствуют случаю $\omega_0 \neq \omega = 1{,}05$. При выборе групп параметров ω, A учитывали два фактора: изменение амплитуды колебаний и интенсивности воздействия. Переход к новой частоте силового воздействия требует повышения интенсивности воздействия на 60 % при таком же увеличении фактической максимальной амплитуды в 1,8 раза.

На рис. 3 представлены зависимости от дополнительного параметра A максимальной фактической амплитуды колебаний Af и суммарной интегральной интенсивности воздействия Iu за период колебаний T при отсутствии периодических возмущений ($B = 0$, $h = 0$).

Увеличение значения дополнительного показателя A приводит к более существенному росту интенсивности воздействия, чем рост максимальной фактической амплитуды колебаний.

При наличии одновременно двух источников внешних возмущений с применением силового воздействия ($B = 0{,}5$, $h = 0{,}5$) максимальная фактическая амплитуда по сравнению с вариантом без наличия периодических возмущений возрастает в 1,5...2,0 раза, а переход к новой частоте силового воздействия требует повышения интенсивности воздействия на 70 % (рис. 4).

На рис. 5 и 6 видно появление неустойчивого режима при параметрическом воздействии и применение метода его стабилизации. Пара-

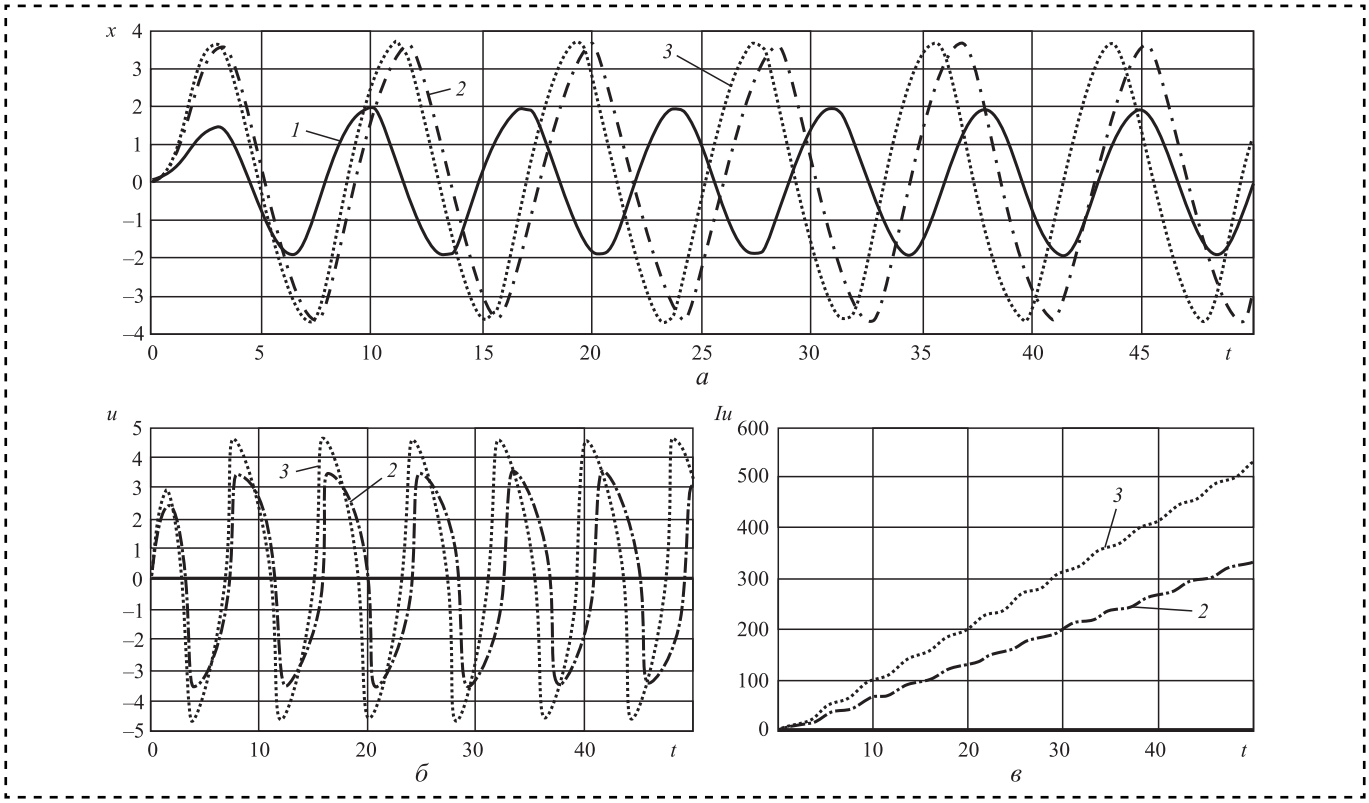


Рис. 2. Результаты численного решения уравнения (1) при отсутствии периодических возмущений ($B = 0$, $h = 0$) с применением закона силового воздействия (ω_0; $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$):
1 — $A = 1{,}698$; $\omega = 1$; $Iu = 0$; *2* — $A = 2{,}5$; $\omega = 1$; $Iu = 329{,}7501$; *3* — $A = 2{,}5$; $\omega = 1{,}05$; $Iu = 527{,}2989$

метры расчетов и типы линий при выводе графиков совпадают с расчетами силового воздействия ($B = 0$, $h = 0$) с применением закона параметрического воздействия.

Параметры ω, A кривых *1* соответствуют случаю отсутствия силового воздействия.

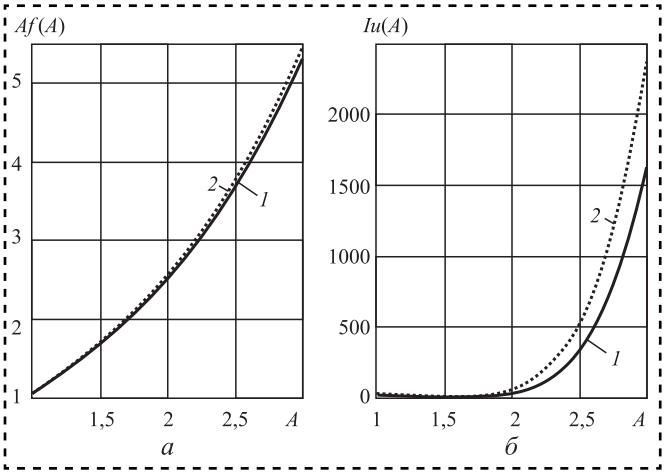


Рис. 3. Результаты численного расчета влияния групп параметров ω, A на максимальную амплитуду Af (*а*) и интенсивность воздействия Iu (*б*) ($\omega_0 = 1$; $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$; $h = 0$; $B = 0$):
1 — $\omega = 1$; $A^* = 1{,}7$; *2* — $\omega = 1{,}05$

Кривые *2* описывают случаи равенства частот $\omega_0 = \omega$ при $A = 1{,}8$, когда фактическая максимальная амплитуда возрастает, но колебания носят устойчивый характер (см. рис. 5, *б*). Кривые *3* соответствуют случаю равенства частот $\omega_0 = \omega$ и параметру $A = 1{,}8422$, при котором фактическая максимальная амплитуда также возрастает, но с некоторого момента времени возникает неустойчивый режим, причем при дальнейшем увеличении параметра A время начала неустойчивого режима значительно сокращается (см. рис. 5, *в*).

Введением расширенного параметрического возбуждения осуществляется стабилизация режима, при которой неустойчивость пропадает ($B = 0$, $h = 0$):

$$\ddot{x} + \omega_0^2\left(1 + \nu(x, \dot{x})(1 + \rho(A^* - A)\right)x + \\ + k_1\dot{x}\,\mathrm{abs}(\dot{x}) - k_2\,\mathrm{sign}(\dot{x}) + 2k_3\dot{x} + k_4\dot{x}^3 = 0; \quad (10)$$

$$I\nu = \int_0^T \left(\omega_0^2\nu(x, \dot{x})\left(1 + \rho(A^* - A)\right)x\right)^2 dt, \quad (11)$$

где ρ — параметр, зависящий от требования к степени возбуждения колебаний, $\rho > 0$.

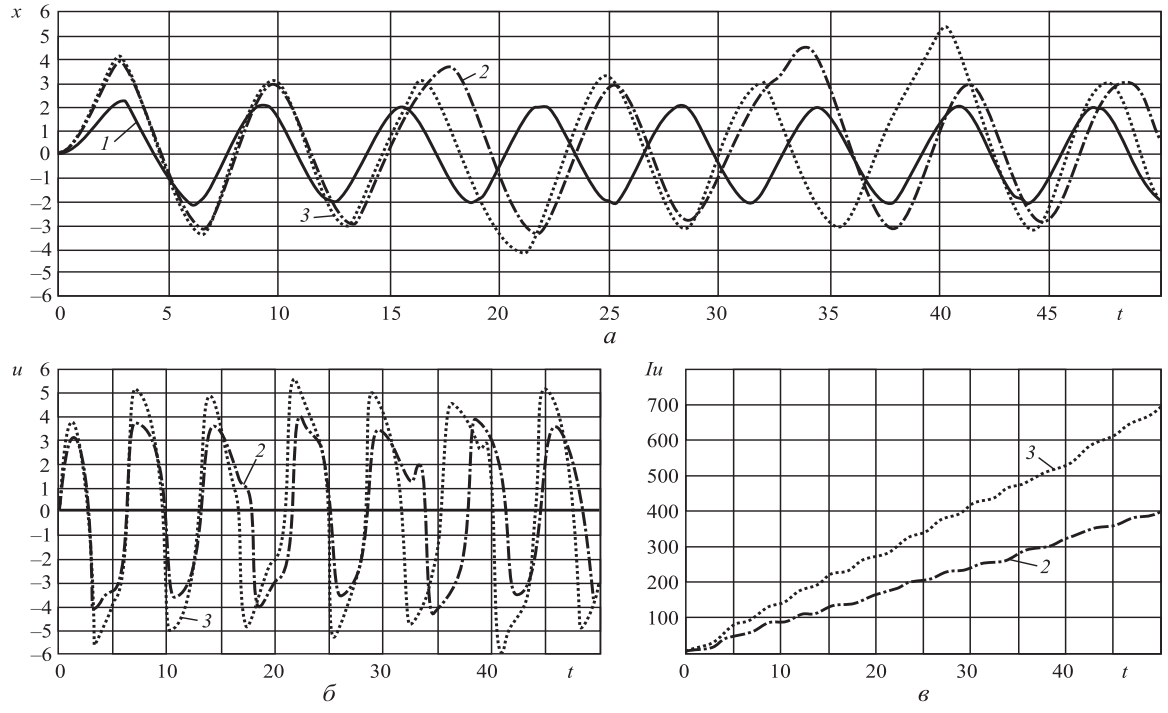


Рис. 4. Результаты численного расчета при наличии периодических возмущений с применением закона силового воздействия ($\omega_0 = 1$; $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$; $h = 0{,}5$; $B = 0{,}5$):
а — $x(t)$; *б* — $u(t)$; в — $Iu(t)$;
1 — $A = 2{,}012$; $\omega = 1$; $Iu = 0$; *2* — $A = 2{,}75$; $\omega = 1$; $Iu = 393{,}5521$; *3* — $A = 2{,}75$; $\omega = 1{,}05$; $Iu = 690{,}6163$

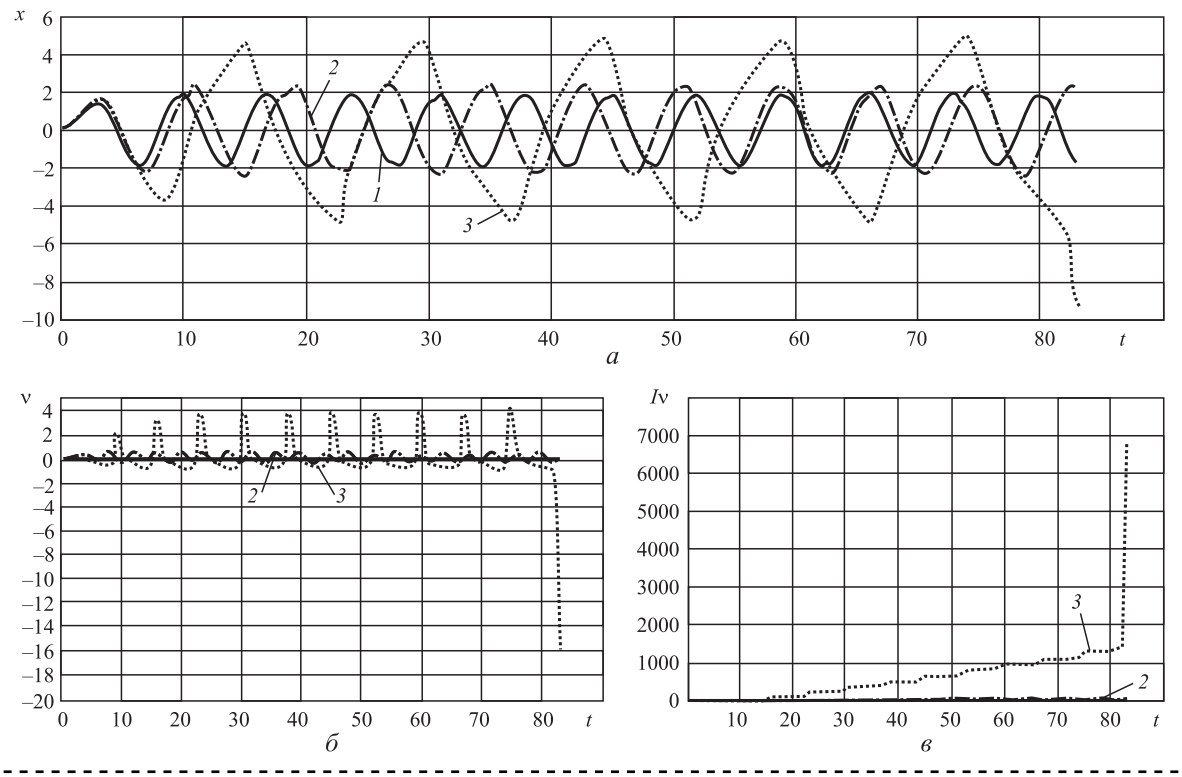


Рис. 5. Результаты численного расчета при отсутствии периодических возмущений ($\omega_0 = 1$; $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$; $h = 0$; $B = 0$):
1 — $A = 1{,}698$; $\omega = 1$; $Iv = 0{,}0001$; *2* — $A = 1{,}8$; $\omega = 1$; $Iv = 28{,}1688$; *3* — $A = 1{,}8422$; $\omega = 1$; $Iv = 6262{,}6832$

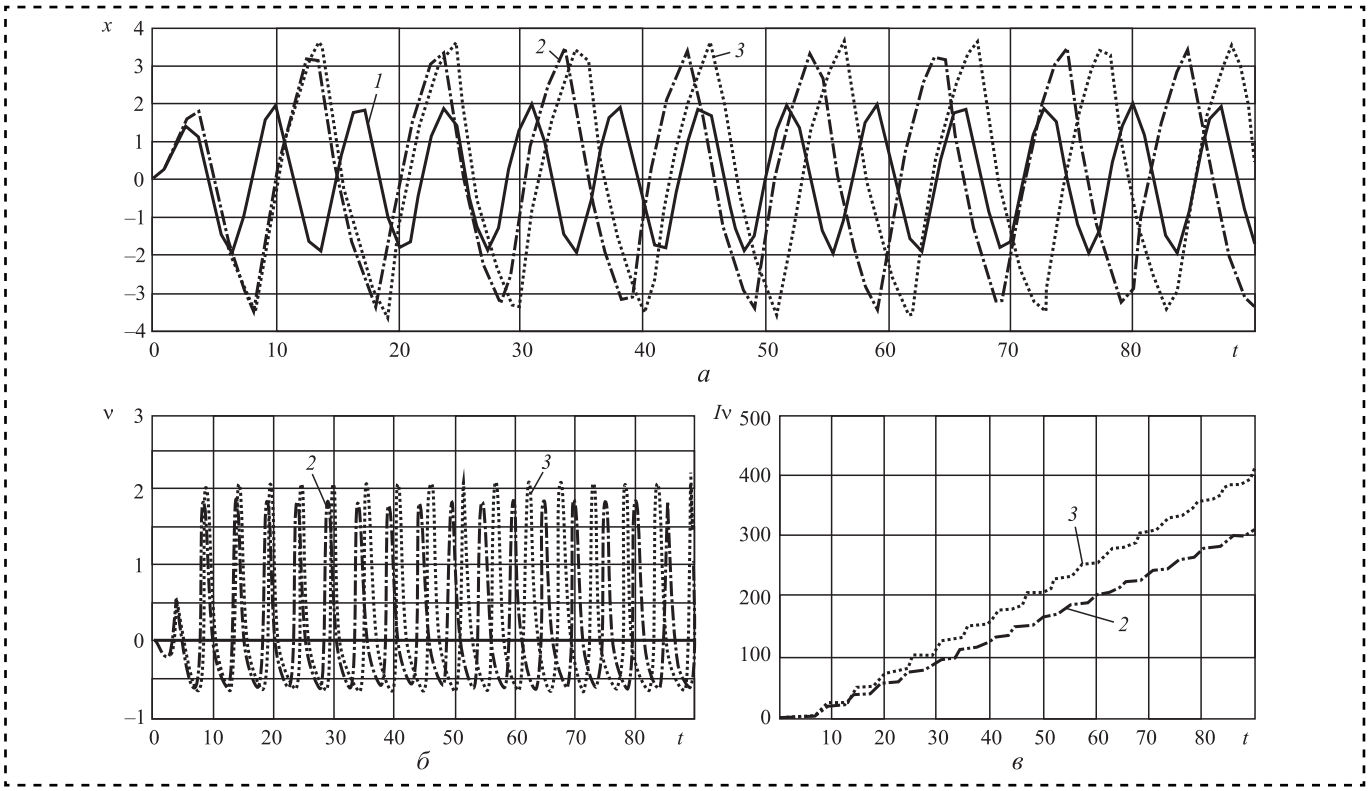


Рис. 6. Результаты численного расчета стабилизации неустойчивого режима при параметрическом воздействии ($\omega_0 = 1$; $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}3$; $k_3 = -0{,}5$; $k_4 = 0{,}5$; $h = 0$; $B = 0$):
1 — $A = 1{,}698$; $\omega = 1$; $I\nu = 0{,}0001$; $\rho = 0$; *2* — $A = 1{,}8422$; $\omega = 1$; $I\nu = 289{,}3606$; $\rho = 0{,}079$; *3* — $A = 2$; $\omega = 1$; $I\nu = 388{,}1373$; $\rho = 1{,}5123$

Графики расчета зависимости от времени амплитуды колебаний $x(t)$ (рис. 6, *а*), закона расширенного параметрического воздействия $\nu(t)$ (рис. 6, *б*) и интегральной интенсивности воздействия $I\nu(t)$ (рис. 6, *в*) для двух вариантов стабилизации режимов возбуждения в случае их неустойчивости.

Кривые *2* ($A = 1{,}8422$) и кривые *3* ($A = 2{,}0$) показывают стабилизацию неустойчивого режима при параметрическом воздействии. В обоих вариантах максимальная фактическая амплитуда возросла примерно в 2 раза. При дальнейшем увеличении дополнительного параметра $A > 2{,}0$ стабилизация также происходит, но только при одновременном уменьшении максимальной фактической амплитуды и интенсивности воздействия.

Выводы

1. Разработана методика активного возбуждения колебаний в машинах и механизмах с характеристиками сложного типа функции нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил, при наличии одновременно двух источников внешних возмущений, при несовпадении собственной частоты колебаний и частоты параметрического и силового воздействия. При выборе параметров воздействия учитывают два фактора: возрастание амплитуды колебаний и рост интегральной интенсивности воздействия. Структура использованных законов воздействия определена с применением методов линеаризации и теории оптимального управления. Путем введения расширенного параметрического возбуждения показана возможность обеспечения стабилизации режимов в случае их неустойчивости.

2. Приведенные результаты расчетов подтверждают работоспособность предлагаемой методики.

Библиографический список

1. **Израилович М.Я.** Синтез систем возбуждения квазигармонических автоколебаний. М.: Либроком, 2011. С. 120.

2. **Израилович М.Я., Обухов А.Н.** Параметрическое управление автоколебаниями. М.: Либроком, 2010. С. 160.

3. **Израилович М.Я., Эрлих Б.М.** Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Спутник, 2015. С. 38.

УДК 620.19+620.179.1

И.А. Меделяев, *д-р техн. наук,* **В.В. Спирягин**
(Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха, Моск. обл.),
Н.И. Кончаков, *канд. техн. наук,* **И.В. Кобзев**
(ПАО "Криогенмаш", г. Балашиха, Моск. обл.)
E-mail: medd_ia@mail.ru

Исследование напряженно-деформированного состояния медных труб при их развальцовке в отверстия трубных решеток теплообменных аппаратов и воздействии эксплуатационных нагрузок

Приведены результаты численного моделирования процесса развальцовки труб, выполненных из меди марки М3р, в отверстия трубных решеток с двумя кольцевыми канавками. Проведен анализ распределения эквивалентных напряжений при действии эксплуатационных нагрузок при помощи метода конечных элементов. Определены основные неблагоприятные факторы, влияющие на герметичность вальцовочного соединения.

The results of numerical simulation of the process of rolling pipes made of copper grade M3r, in the holes of pipe gratings with two annular grooves. The analysis of the distribution of equivalent stresses under the action of operational loads using the finite element method is carried out. The main adverse factors affecting the tightness of the rolling joint are determined.

Ключевые слова: метод конечных элементов, теплообменные аппараты, испарители, герметичность, пластическая деформация.

Keywords: finite element method, heat exchangers, evaporators, tightness, plastic deformation.

Основное условие работоспособности теплообменных аппаратов (ТА) — обеспечение герметичности в целях исключения смешения сред.

Для обеспечения герметичности ТА используют различные варианты крепления труб в трубной решетке [1]. Численное моделирование процесса "гладкой" развальцовки стальной трубы в эквивалентную втулку показало, что остаточное контактное давление между трубой и отверстием трубной решетки характеризуется значительной неравномерностью [2]. С увеличением степени развальцовки распределение контактных давлений выравнивается по ширине развальцовки.

При проектировании таких ТА, как испарители холодильных машин (ХМ), выбирают способ крепления трубок при помощи развальцовки в трубную решету с двумя кольцевыми канавками (рис. 1), который обеспечивает надежную герметизацию ТА и защиту трубок от вырывания. Однако нарушение технологии вальцовки (недовальцовка или перевальцовка) может привести к возникновению дефектов,

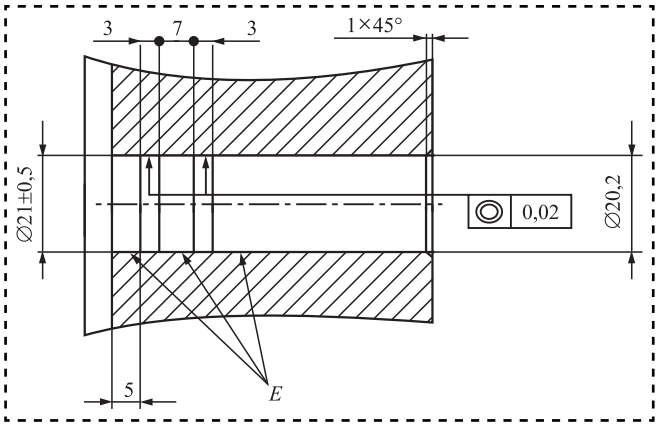


Рис. 1. Схема вальцовочного соединения с двумя кольцевыми уплотнительными канавками

в том числе скрытых, развивающихся в процессе эксплуатации.

В действующей нормативно-технической документации в табличной форме приводятся данные об оптимальном крутящем моменте развальцовки разных типов труб при различном сочетании материалов [1]. Однако такие сведения не охватывают весь спектр применяемых материалов и труб. Как следствие, данные об оптимальном крутящем моменте для труб, выполненных из меди М3р не приводятся, а минимальные и максимальные усилия вальцовочного инструмента определяются экспериментально. При выборе неоптимального крутящего момента при развальцовке труб может быть не обеспечено требуемое значение остаточного давления прижатия трубы к стенке отверстия, способствующее образованию щели между стенкой трубки и трубной решеткой, что в процессе эксплуатации ТА может привести к нарушению герметичности соединения "труба — трубная решетка".

По результатам эксперимента, проведенного на заводе-изготовителе исследуемого испарителя, определена максимальная сила вальцовочного инструмента, равная 7 МН/м^2.

Дефекты испарителей ХМ [3], трубные пучки которых выполнены из меди М3р, возникают в местах соединения трубок с кольцевыми уплотнительными канавками (рис. 2 на стр. 3 обложки).

Предположим, что данные участки являются концентраторами наибольших остаточных напряжений при проведении вальцевания, и нарушение технологии вальцовки в совокупности с эксплуатационными факторами может способствовать накоплению пластических деформаций, приводящих к смятию медных труб.

В целях проверки выдвинутого предположения, исследования закономерностей распределения напряжений в зоне вальцовочного соединения и учета влияния кольцевых канавок на напряженно-деформированное состояние (НДС) материала труб проведены численное моделирование процесса развальцовки медной трубы в трубной решетке испарителя и анализ распределения эквивалентных напряжений при действии эксплуатационных нагрузок при помощи метода конечных элементов с помощью программного комплекса ABAQUS с использованием решателей ABAQUS/EXPLICIT и ABAQUS/STANDARD static, general в осесимметричной постановке.

Конечно-элементная осесимметричная модель соединения труба—трубная решетка построена с учетом следующих исходных данных: длина ролика вальцовки l = 5,5 мм; ширина ролика b = 2 мм; наружный диаметр трубки d = 20 мм; толщина стенки трубки s = 2 мм; длина трубки L = 65 мм; внутренний диаметр отверстия трубной решетки D = 20,2 мм; толщина трубной решетки S = 63 мм. Развальцовку проводили на глубину $L_в$ = 40 мм. Материал ролика — сталь ШХ15 с пределом текучести $\sigma_{0,2}$ = 1670 МПа; материал трубной решетки — сталь Ст3Сп с $\sigma_{0,2}$ = 210 МПа, труба выполнена из меди марки М3р с $\sigma_{0,2}$ = 55 МПа. Модули упругости E материалов приняты равными $2{,}1\cdot10^5$; $1{,}98\cdot10^5$ и $1{,}1\cdot10^5$ МПа соответственно. За начало оси координат принята торцевая левая сторона трубной решетки (рис. 3 на стр. 3 обложки).

К трубной решетке приложены следующие граничные условия по внешней поверхности: запрет на перемещение по оси X и Y. Медная трубка закреплена по оси Y с внутренней стороны теплообменника. К ролику вальцовки приложено ограничение, определяющее его перемещения по осям X и Y (рис. 4).

После дискретизации модели провели моделирование процесса вальцевания с силой 7 МН/м^2 и параметрами движения ролика, представленными на рис. 4.

Наибольшие эквивалентные деформации и напряжения, рассчитанные по теории прочности Мизеса, сосредоточены в конечной части переходной зоны от деформированного участка трубы к недеформированному (X = 35...40 мм) (рис. 5 на стр. 3 обложки). Аналогичные результаты получили при проведении численного моделирования трубы в трубную решетку без кольцевых канавок [2].

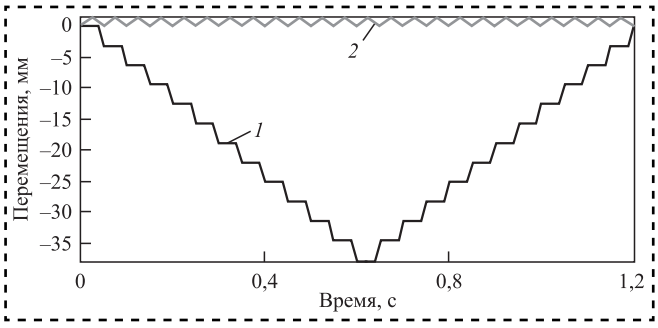


Рис. 4. Движение ролика вальцовки при проведении развальцовки:
1 — перемещения по оси *X*; *2* — перемещения по оси *Y*

Данный факт может быть связан с остановкой ролика вальцовки и переключением на реверс при извлечении из трубной решетки, в результате чего материал в переходной зоне испытывает дополнительные окружные напряжения.

При развальцовке происходит упрочнение материала трубок, связанное со структурными изменениями металла вследствие нагартовки.

С ростом пластической деформации меди увеличивается область упругих деформаций, повышая прочностные характеристики металла (твердость, предел упругости $\sigma_{уп} = \sigma_A$, временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, предел текучести $\sigma_{0,2}$), однако такие свойства, как пластичность и электрическая проводимость, при этом снижаются. Графическое отображение процесса упрочнения металлов представлено на рис. 6.

Если нагрузка не превысила $\sigma_{0,2}$, то после ее снятия изменений в металле не произойдет, но если нагрузка превысила предел текучести и напряжения, например, равнялись σ_1, то после снятия нагрузки вследствие образовавшихся в металле сдвигов останется деформация, равная A (см. рис. 6). При повторном нагружении металла, способность к пластической деформации уменьшается, а предел текучести повышается до σ_1 [4].

В зависимости от степени деформации, пределы текучести нагартованной меди находятся в диапазоне 280...400 МПа [5, 6]. В связи с этим для определения надежности вальцовочного соединения целесообразно проведение анализа распределения напряжений при действии эксплуатационных нагрузок.

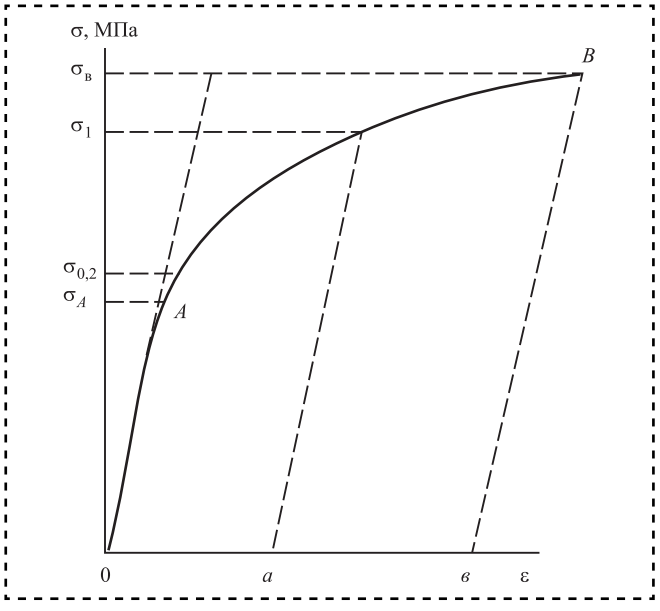


Рис. 6. Связь между напряжением σ и степенью относительной деформации ε:
$0A$ — участок упругой деформации; AB — участок пластической деформации; σ_A — напряжения в точке A

В целях осуществления данного анализа полученные результаты импортировали в решатель ABAQUS/STANDARD. Сетку конечных элементов и геометрию модели не меняли. Граничные условия для трубной решетки и трубки применяли из предыдущего расчета. Закрепления аналогичны рис. 3. Добавили следующие граничные условия: температура трубы $t = 2$ °С; температура трубной решетки $T = 7$ °С; давление в трубном пространстве $P = 0{,}4$ МПа, в межтрубном пространстве $p = 0{,}6$ МПа (рис. 7 на стр. 4 обложки).

По результатам расчета построены эпюры распределения эквивалентных напряжений в стенке трубки при действии эксплуатационных нагрузок с учетом процесса развальцовки (рис. 8 на стр. 4 обложки).

Графики распределения окружных σ_t и радиальных σ_r напряжений на внутренней стенке при проведении вальцевания и действия эксплуатационных нагрузок представлены на рис. 9 (стр. 4 обложки).

Наибольшие напряжения как после вальцевания, так и при статическом нагружении, действуют в окружном направлении и направлены на сжатие. Распределение напряжений характеризуется существенной неоднородностью. Наибольшие напряжения сосредоточены в переходной зоне, а также в области контакта с кольцевыми канавками (участки $X = 10$; 20; 25...40).

Эквивалентные напряжения по Мизесу в конечной части переходной зоны равны 321 МПа, что близко к среднему значению предела текучести нагартованной меди $\sigma_{0,2н} = 340$ МПа и может свидетельствовать о выборе неоптимального усилия вальцовочного инструмента.

Главное условие герметичности вальцовочного соединения — создание необходимого контактного давления между трубой и отверстием трубной решетки. По результатам численного моделирования среднее контактное давление после вальцевания составило 29,9 МПа, однако в исследуемом соединении присутствуют участки, где контакт между трубной решеткой и медной трубкой отсутствует, что может привести к увеличению диаметрального зазора и развитию щели в вальцовочном соединении (рис. 10 на стр. 4 обложки).

Проверим соответствие значения остаточного контактного давления, полученного по результатам численного моделирования с учетом экспериментально установленной силы вальцовочного инструмента, наименьшему радиальному остаточному давлению P_0, возникающему после окончания развальцовки на поверхности соприкасания трубы и трубной решетки по ГОСТ Р 55601—2013, используя формулы [1]:

$$P_0 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т\left[\frac{P_1}{1+\left(\beta^2-1\right)^{-1}c^{-1}} - n_т \ln\beta\right]; \quad (1)$$

$$P_1 = \min\left\{1;\ \ln\beta_{min} + \frac{\sigma_р}{\sigma_т}\ln k;\right.$$

$$\left. 2\ln\beta_{min}\left[1+\left(\beta_{min}^2-1\right)^{-1}c^{-1}\right]\right\}; \quad (2)$$

$$\beta = \beta_{min} = \left(1 - 2\frac{S_{min}}{d_e^{max}}\right)^{-1}; \quad (3)$$

$$\beta = \beta_{max} = \left(1 - 2\frac{S_{max}}{d_e^{min}}\right)^{-1}; \quad (4)$$

$$c = \frac{1}{3} + \frac{E_т}{E_р}\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{k^2-1}\right); \quad (5)$$

$$k = 3,2\frac{t}{d_р} - 2,2; \quad (6)$$

$$n_т = \frac{\sigma_т^{max}}{\sigma_т}, \quad (7)$$

где $\sigma_т$, $\sigma_р$ — наименьшие пределы текучести трубы и трубной решетки;

d_e^{max}, S^{max}, d_e^{min}, S^{min} — наибольшие и наименьшие предельные значения наружного диаметра и толщины стенки трубы;

P_1 — относительное оптимальное давление развальцовки, МПа;

β — коэффициент толстостенности трубы;

k — коэффициент толстостенности цилиндрической втулки, эквивалентной трубной решетке по сопротивлению деформациям при развальцовке;

t — шаг расположения, мм;

$d_р$ — диаметр трубных отверстий, мм.

Определим допускаемую нагрузку q, приходящуюся на единицу поверхности, при развальцовке труб в трубной решетке двумя кольцевыми канавками [7]:

$$q = 30\frac{\sigma_{0,2}}{230} = 30\frac{55}{230} = 7,17\ \text{МН/м}^2. \quad (8)$$

Аналитически установлено, что наименьшее контактное давление, возникающее после окончания развальцовки на поверхности соприкасания трубки и решетки при условии $\beta = \beta_{max}$, составляет 20 МПа, а значение допускаемой нагрузки, приходящейся на единицу поверхности $q = 7,17$ МН/м^2, что удовлетворяет экспериментальным данным и результатам численного моделирования.

Выводы

1. В отличие от "гладкой" развальцовки при вальцевании труб исследуемым способом в области уплотнительных канавок создается неоднородное напряженное поле, которое в сочетании с эксплуатационными нагрузками может привести к местной потере устойчивости медной трубы.

2. Наибольшие эквивалентные напряжения, сосредоточенные в конечной части переходной зоны материала трубы, и неоднородное контактное давление в соединении "труба—трубная решетка" — неблагоприятные факторы и в процессе эксплуатации испарителя могут привести к увеличению диаметрального зазора вальцовочного соединения с образованием щели, способствующей в определенных условиях местной потере устойчивости и смятию теплообменных труб.

Библиографический список

1. **ГОСТ Р 55601—2013.** Аппараты теплообменные и аппараты воздушного охлаждения. Крепление труб в трубных решетках. М.: ВНИИнефтемаш, 2014. 64 с.

2. **Газитуллин А.А., Ризванов Р.Г., Хабирова Г.Ф.** Численное моделирование процесса развальцовки трубы в трубной решетке теплообменника // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2006. № 2.

3. **Спирягин В.В.** Анализ технического состояния металлоконструкций систем охлаждения ракетной техники, способов оценки и продления сроков их службы // VII Междунар. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" / сб. материалов. М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 742—744.

4. **Гуляев А.П.** Металловедение: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

5. **Материаловедение:** учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 648 с.

6. **Логинов Ю.Н.** Медь и деформируемые медные сплавы: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2004. 136 с.

7. **Лащинский А.А., Толчинский А.Р.** Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1970. 752 с.

ИНФОРМАЦИЯ

УДК 621.890

И.А. Буяновский, *д-р техн. наук,* **В.Д. Самусенко,** *канд. техн. наук,*
М.Н. Зеленская *(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)*
E-mail: buyan37@mail.ru

XII Международная научно-техническая конференция "Трибология — машиностроению", посвященная 80-летию ИМАШ РАН

В период 19—21 ноября 2018 г. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Межведомственный научный совет по трибологии при РАН, Минобрнауки РФ и Совете НИО РФ и Ассоциация инженеров-трибологов России при информационной поддержке журналов "Трение и износ", "Сборка в машиностроении, приборостроении" и "Lubricants" провели традиционную Международную научно-техническую конференцию "Трибология—машиностроению", посвященную 80-летию Института машиноведения. Изучение процессов трения и износа в машинах — одно из важнейших направлений деятельности ИМАШ РАН на всем протяжении этих лет.

В работе Конференции приняли участие 159 специалистов по трибологии и сопутствующим дисциплинам, включая директора ИМАШ РАН проф. В.А. Глазунова, председателя Межведомственного совета по трибологии акад. И.Г. Горячеву, президента АИТР проф. Ю.М. Лужнова, выдающихся трибологов акад. НАН Беларуси Н.К. Мышкина, проф. А.Ю. Албагачиева, В.А. Годлевского, А.Я. Григорьева, С.М. Захарова, А.П. Краснова, О.П. Паренаго, Л.А. Савина, В.В. Шаповалова, Л.Ш. Шустера и др. Авторами докладов были представители академических институтов (ИМАШ РАН; ИПМех РАН; ИНЭОС РАН; ИММС НАН Беларуси и др.), высших учебных заведений (НИТУ "МИСиС"; РГУПС, ДГТУ и ИвГУ; МГТУ им. Баумана; ОГУ им. Тургенева и др.); ряда исследовательских и проектных организаций (Технопарк ХТЦ УАИ, АО "ВНИИ ЖТ"; ООО "ЦИАМ им. Баранова" и др.).

Всего на конференции было представлено и обсуждено 15 пленарных и 110 секционных докладов. Секционные доклады заслушаны на заседаниях следующих секций:

1. Фундаментальные проблемы трибологии.
2. Смазка и смазочные материалы.
3. Трибологическое материаловедение.
4. Нанотрибология.
5. Металлообработка.

В представленных докладах отражены как последние достижения в области трибологии, так и успехи в реализации этих достижений на практике, прежде всего — в области машиностроения. Основная направленность Конференции — рассказать об этапах 80-летней истории развития Института машиноведения от его основания (Распоряжение № 210 по ОТН АН СССР от 10.11.1938 г.) до сегодняшнего дня, его вкладе в технический прогресс нашей страны.

Пленарное заседание Конференции открыл директор ИМАШ РАН, проф. В.А. Глазунов докладом "Трибологические вопросы в механизмах параллельных структур систем робототехники", который раскрыл собравшимся характер основных трибологических проблем в этой области техники. В следующем докладе (авторы И.А. Буяновский и др.) рассмотрены авторитетные научные трибологические школы, которые создали и много лет возглавляли знаменитые сотрудники ИМАШ: профессора М.М. Хрущов, И.В. Крагельский, А.И. Петрусевич, С.В. Пинегин и Ю.Н. Дроздов. Эти школы, сформированные в ИМАШ, оказали огромное влияние на развитие отечественной и мировой трибологии и прославили ИМАШ и всю отечественную науку. В докладе также показано, какую важную роль в образовании и развитии этих школ сыграл первый директор ИМАШ академик Е.А. Чудаков.

Значительный интерес участников Конференции вызвал пленарный доклад Н.К. Мышкина и А.Я. Григорьева "Проблемы анализа механизмов трения", в котором рассмотрены проблемы, связанные с созданием единой теории трения

Открытие конференции (за столом президиума слева направо: академик НАН Беларуси Н.К. Мышкин, академик РАН И.Г. Горячева, д.т.н. В.А. Глазунов, д.т.н. И.А. Буяновский)

Идет пленарное заседание

и обусловленные взаимодействием механических факторов и физической природой поверхностных сил, неизбежных в условиях фрикционного контакта. Ряд интересных докладов, связанных с развитием теории трения и изнашивания, был сделан на заседаниях секции "Фундаментальные проблемы трибологии" и других секций. Это доклады А.В. Бородая "О механизме сцепления тел при фрикционном взаимодействии" и "О физической сущности понятия фрикционной связи", С.М. Гайдара и А.Б. Лагутина "Молекулярная инженерия в трибологии", В.И. Савенко "Математическая модель процесса диссипации энергии при квазиупругом качении", А.Н. Любичевой "Влияние адгезионного взаимодействия поверхностей на контактные характеристики при индентировании вязкоупругих тел с разгрузкой", Е.В. Торской "Исследование фрикционного разогрева твердых тел с покрытиями".

Представитель фирмы Anton Paar GmbH Dr. Kartik S. Pondicherry (Швейцария), рассказывает о выпускаемом оборудовании для трибологических исследований

Выступление д.т.н. А.Я. Григорьева с докладом "Структура и механические свойства граничных слоев растительных масел"

Н.А. Воронин в пленарном докладе представил теоретическое описание диаграммы внедрения при инструментальном индентировании материалов с поверхностным покрытием или упрочненным поверхностным слоем, включающее анализ процессов деформирования с учетом топокомпозиционной структуры поверхности, в процессе которого установил явление дополнительного пластического деформирования основы топокомпозита. К фундаментальным проблемам трибологии относятся также ряд докладов, посвященных проблемам жидкостной смазки, например, пленарный доклад Л.А. Савина и А.В. Корнаева, в котором рассмотрены особенности современного этапа развития и проблемные вопросы гидродинамической теории смазки, а также методологические аспекты проектирования триботехнических систем со встроенными функциями автоматизированной диагностики и активного управления режимом функционирования. В этом же докладе приведен анализ факторов, влияющих на формирование полей термомеханических величин в смазочных слоях.

Ряд докладов — как пленарных, так и секционных — посвящен вопросам моделирования триботехнических процессов. В докладе "Моделирование и экспериментальное изучение трения эластомеров" И.Г. Горячева изложила результаты моделирования и экспериментальных исследований, проводимых в Лаборатории трибологии ИПМех РАН, по изучению фрикционных характеристик различных эластомерных материалов в широком диапазоне скоростей, контактных давлений и температур в условиях трения без смазочного материала и при граничной смазке. В докладе В.А. Годлевского "Некоторые принципы построения молекулярных моделей трибосистем со смазочным слоем" рассмотрен комплекс проблем, связанных с применением компьютерного моделирования для имитации трибосистемы, состоящей из пары поверхностей трения и разделяющего их смазочного слоя, сформулированы принципы организации вычислительной среды для работы с моделями трибосистем, а также оценены перспективы компьютерного моделирования для прогнозирования параметров трибосистем и разработки новых смазочных материалов. Большой интерес слушателей вызвали секционные доклады С.М. Захарова и И.Г. Горячевой "Моделирование возникновения контактно-усталостных повреждений в рельсах", доклад Е.В. Торской "Моделирование скольжения контакта жестких тел по вязкоупругому покрытию", П.И. Маленко и др. "Моде-

лирование методом молекулярной динамики процессов эволюции трещин и пор в поверхностной зоне сталей с покрытием при трении скольжения с ресурсным смазыванием", доклад А.В. Корнаева и др. "Математическое моделирование течений сред сложной реологии в тонких кольцевых каналах гидромеханических систем" и др. Ряд докладов посвящен технике и технологии трибологических испытаний. В докладе Ю.И. Густова и И.В. Ворониной предложен новый, деформационно-топографический метод исследования триботехнических показателей новой техники. Доклад Л.А. Шабалинской и др. посвящен контролю состояния и трибодиагностике деталей узлов трения вертолетных главных редукторов ВР-226, ВР-294 и ВР-382.

В.Л. Попов в пленарном докладе напомнил участникам конференции об еще одной памятной дате — 60-летии со дня разработки известным американским исследователем Э. Рабиновичем критерия адгезионного износа, согласно которому критический размер частицы износа определяется соотношением значений удельной работы адгезии контактирующих материалов, модуля упругости и предела текучести, прогностическая способность которого до сих пор не исчерпана.

С.М. Захаров показал в пленарном докладе, что основные проблемы, связанные с трибологией на железнодорожном транспорте, охватывают разные аспекты тяжеловесного и скоростного движения, включая вопросы торможения, токосъема, системную проблему "колесо—рельс" и связанную с ней проблему сцепления, а также проблему безопасности движения, экономии энергии и топлива, экологические вопросы. Проведенные исследования в области моделирования возникновения контактно-усталостных повреждений в рельсах содержал его второй доклад, сделанный совместно с И.Г. Горячевой на секции "Фундаментальные проблемы трибологии". Об актуальности затронутых проблем свидетельствует также доклад Ю.М. Лужнова и др. "Проблемы интенсивного износа рельс и колес, реальные и эффективные возможности их решения".

Авторы некоторых докладов сформулировали требования, предъявляемые к материалам, включая смазочные, применительно к определенным отраслям техники и обсудили уровень соответствия качества существующих материалов предъявляемым требованиям, а также методы их подбора (М.А. Броновец "Трибология и материалы для космической техники" и В.В. Титов "Пути создания новых конструкционных, смазочных материалов для ОКБ Сухого").

Применение смазочных материалов — один из наиболее эффективных методов управления трибологическими процессами. Поэтому вопросы качества инновационных и модернизированных смазочных материалов в условиях рыночной и плановой экономики приобретают большое значение. Эти вопросы рассмотрены в докладе А.Н. Абрамова и В.Ю. Шолома. Многие участники конференции посвятили свои доклады оптимизации смазочных материалов. В пленарном докладе И.А. Любинина "Влияние твердых добавок на трибологические характеристики пластичных смазок" доказано, что введение в пластичные смазки нанопорошков дихалькогенидов тугоплавких металлов существенно повышает их антифрикционные и противоизносные свойства. Ряд других докладов также посвящен

Выступление д.т.н. С.М. Захарова с докладом "Актуальные проблемы трибологии на железнодорожном транспорте"

Выступление д.ф.-м.н. В.Л. Попова с докладом "60 years of Rabinowicz criterion of adhesive wear: history and recent advancements in simulation of adhesive wear"

Выступление к.т.н. И.А. Любинина с докладом "Влияние твердых добавок на трибологические характеристики пластичных смазок"

Выступление д.т.н. В.А. Годлевского с докладом "Некоторые принципы построения молекулярных моделей трибосистем со смазочным слоем"

повышению уровня эксплуатационных свойств смазочных сред за счет применения присадок (В.М. Петров, В.В. Алисин и др.).

При этом следует иметь в виду, что смазочные материалы при изготовлении, транспортировке, хранении и особенно в процессе утилизации после выработки своего ресурса, оказывают отрицательное влияние на экологию. Это явление рассмотрено в пленарном докладе А.Ю. Евдокимова "Экологические проблемы трибологии в контексте круговорота углерода в природе". Он показал принципиальную невозможность сбалансированности техногенных и биосферных процессов, указав, однако на необходимость соответствующих технических и законотворческих мероприятий для снижения неблагоприятного воздействия продуктов трибологических процессов (например, отработанных масел) на экологию. Анализу этой проблемы посвящен ряд докладов (например, А.Т. Романовой и др. "Влияние характеристик трибосистем на их эколого-экономические показатели" и Г.И. Шульги и др. "Комплексный индекс экологичности трибосопряжений транспортно-технологического комплекса" и др.).

Одна из актуальных задач для специалистов по трибологии — оптимизация состава и структуры трибологических материалов. Решая эту задачу, А.П. Краснов с соавторами разработал концепцию связи различных групп аморфных и кристаллических линейных термостойких термопластов, исходя из представления о решающем вкладе химического строения термопластов в их трибологические характеристики. В пленарном докладе он ввел представление об антифрикционности как опосредствованном выражении их химического строения и потенциальной возможности получения на их основе антифрикционного материала. В.Д. Данилов с соавторами выступил с докладом "Разработка и исследование механических и трибологических свойств композитов на основе термостойких полимеров при разномасштабных наполнителях". В.В. Алисин исследовал трибологические свойства керамического композита с матрицей на основе частично стабилизированного диоксида циркония, поскольку циркониевая керамика по трещиностойкости превосходит другие керамики. А.Ю. Албагачиев обратил внимание на возможность получения материалов с заданными свойствами путем применения покрытий. Решая подобную задачу, В.П. Бирюков и др. повысили износостойкость трущихся деталей за счет получения композиционных покрытий лазерной наплавкой, а затем исследовали их износостойкость.

Ряд исследователей улучшили трибологические характеристики материалов нанесением алмазоподобных покрытий (например, П.А. Тополянский и др. "Алмазоподобное покрытие для упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры".

Интересные доклады были сделаны на секции "Узлы трения". Это, прежде всего, результаты исследований влияния частоты вращения на изнашивание насосных ступеней УЭЦН (авторы Н.И. Смирнов и Н.Н. Смирнов), влияния фактора трения на эффективность бурения горизонтальных скважин большой протяженности (авторы И.А. Буяновский и др.), зависимости коэффициентов трения от частоты вращения вала в конструкции типа "радиальный подшипник в радиальном подшипнике" (автор П.Д. Чхетиани) и др. На этой же секции заслушан весьма актуальный доклад Р.И. Зайнетдинова и И.В. Гадолиной "Ускорение внедрения инновационных технологий в области трибологии и триботехники".

На заключительном заседании выступавшими была дана высокая оценка научного уровня Конференции и хорошей ее организации. Решено провести следующую конференцию "Трибология—машиностроению" в 2020 г.

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) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 10.01.2019. Подписано в печать 06.03.2019. 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.