

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

2021 Том 22  
6 (251)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### *Сборочное оборудование и его элементы*

Иванов А.А., Кретинин О.В. Сборка штепсельных разъемов и ламповых панелей ..... 243

#### *Обеспечение качества. Испытания. Контроль*

Головкин П.А. Повышение качества обоймы ротора стартера-генератора с применением ковочных операций ..... 250

#### *Трение и смазка в машинах и механизмах*

Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Исследование нестационарности при точении жаропрочных сталей и сплавов ..... 255

Эрлих Б.М. Управляющие воздействия для приведения в заданное состояние широкого класса автоколебаний ..... 262

#### *В помощь конструктору, технологу*

Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Устройство автоматизированной установки кольцевых резиновых уплотнений в наружные канавки цилиндрических деталей ..... 268

Губарев П.В., Талахадзе Т.З., Зинченко Н.Н. Минимизация релейных схем в технических устройствах ..... 272

Вартанов М.В., Петров В.К., Чан Динь Ван, Нгуен Ван Зунг. Анализ условий заклинивания при роботизированной сборке профильных соединений ..... 276

Дубовик Е.А. Сварка в среде углекислого газа при ремонте затворов ГЭС .. 285

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.  
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.  
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.  
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.  
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.  
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

#### Региональные редсоветы

##### ВЛАДИВОСТОК

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

##### ВОЛГОГРАД

В.И. ЛЫСАК, акад. РАН

##### 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.  
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.  
А.П. СЫЧЕВ

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

##### 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. ЛЕБОВСКИ, д.т.н.  
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

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.

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

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: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes, 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials

2021 Vol. 22  
6 (251)

### CONTENTS

#### *Production tools and machinery for assembly*

Ivanov A.A., Kretinin O.V. Assembly of plug connectors and lamp panels . . . . . 243

#### *Quality assurance. Testing. Monitoring*

Golovkin P.A. Improvement of quality of the cage of rotor of starter-generator using forging operations . . . . . 250

#### *Friction & lubrication in machines and mechanisms*

Migranov M.Sh., Migranov A.M. The study of the instability during the turning of heat resistant steels and alloys . . . . . 255

Erlich B.M. Control impacts for setting to the set state a wide class of self-oscillations . . . . . 262

#### *Industrial and design engineer's aid*

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu. Device for automated installation of rubber O-rings into the outer grooves of cylindrical parts . . . . . 268

Gubarev P.V., Talakhadze T.Z., Zinchenko N.N. Minimization of relay circuits in technical devices . . . . . 272

Vartanov M.V., Petrov V.K., Than Dinh Van, Nguyen Van Zung. Analysis of jamming conditions during robotic assembly of profile connections . . . . . 276

Dubovik E.A. Welding in the environment of carbon dioxide during the repair of HPP gates . . . . . 285

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. BUYANOVSKIY  
M.V. VARTANOV  
S.M. ZAKHAROV  
I.N. ZININA

Yu.L. IVANOV  
A.V. IGNATOV  
A.I. KUMENKO  
I.A. LUBININ  
B.V. SHANDROV  
A.G. KHOLODKOVA

#### Regional editors

##### VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN  
A.A. SUPONIA

##### VOLGOGRAD

V.I. LYSAK

##### 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  
I.V. KOLESNIKOV  
A.P. SYCHEV

##### 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. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

Journal is distributed on subscription, which 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.

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.

Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

# СБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЕГО ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 658.527.011

DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-6-243-249

**А.А. Иванов, О.В. Кретинин**, д-ра техн. наук  
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)  
E-mail: kretinin@list.ru

## Сборка штепсельных разъемов и ламповых панелей

*Рассмотрено многономенклатурное производство электрических соединителей, или штепсельных разъемов. Участок сборки электрических соединителей содержит необходимое число комплексов сборки пакетов вилки и розетки с комплектами автоматического оборудования касетирования деталей и контроля параметров собранных пакетов, склад для хранения изоляторов, контактов и корпусов в кассетах, соответствующие транспортные средства. Представлены технологические схемы сборки контактных пакетов, модульная сборочная линия и оборудование для автоматизации процессов манипулирования объектами.*

*The production of electrical connectors, or plug connectors, is typically multi-product. The electrical connector assembly area contains the required number of assembly complexes for plug and socket packages with sets of automatic equipment for cassetting parts and monitoring the parameters of assembled packages, a warehouse for storing insulators, contacts and cases in cassettes, and corresponding vehicles. Technological schemes for the assembly of contact packages, a modular assembly line and equipment for automating the processes of manipulating objects are presented.*

**Ключевые слова:** штепсельный разъем, ламповая панель, контактный пакет, модульная сборочная линия.

**Keywords:** plug connector, lamp panel, contact package, modular assembly line.

Производство электрических соединителей (ЭС), или штепсельных разъемов (ШР), является многономенклатурным. Всего насчитывается более 300 основных типов и типоразмеров ЭС с круглыми и прямоугольными изоляторами, с цилиндрическими и ножевыми контактными парами и различной контактностью (от 4 до 102), с различными схемами сборки. Каждому типу и типоразмеру ЭС соответствуют два вида сборочного пакета: розетка и вилка, что существенно увеличивает номенклатуру коммутационных изделий группы ЭС (рис. 1 на стр. 2 обложки).

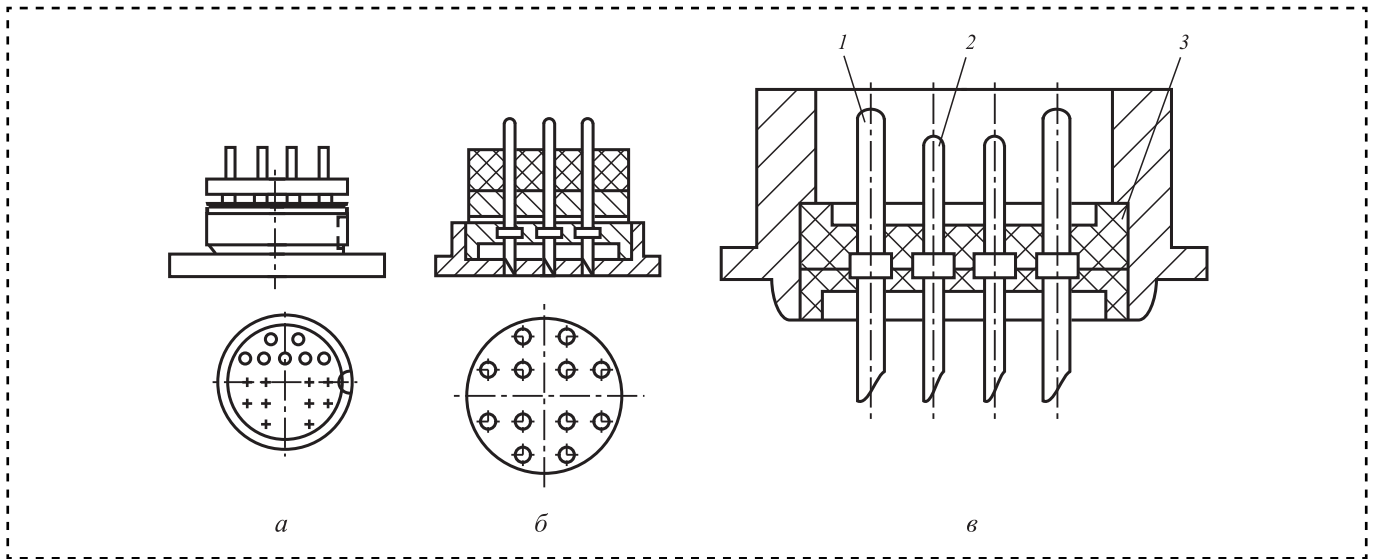
Схемы контактных пакетов миниатюрных электросоединителей и комбинированного пакета с контактами двух типов показаны на рис. 2.

Технологический процесс сборки основного пакета рассмотрим на примере контактной вилки наиболее массового миниатюрного ЭС типа 2PM (рис. 3). На первой операции загрузочный робот устанавливает на транспортный спутник 1 линейного конвейера основной

изолятор 2, сориентированный по плоскости и угловой координате (по продольному боковому пазу). На спутнике 1 изолятор 2 фиксируется штифтом 13 от поворота вокруг своей оси.

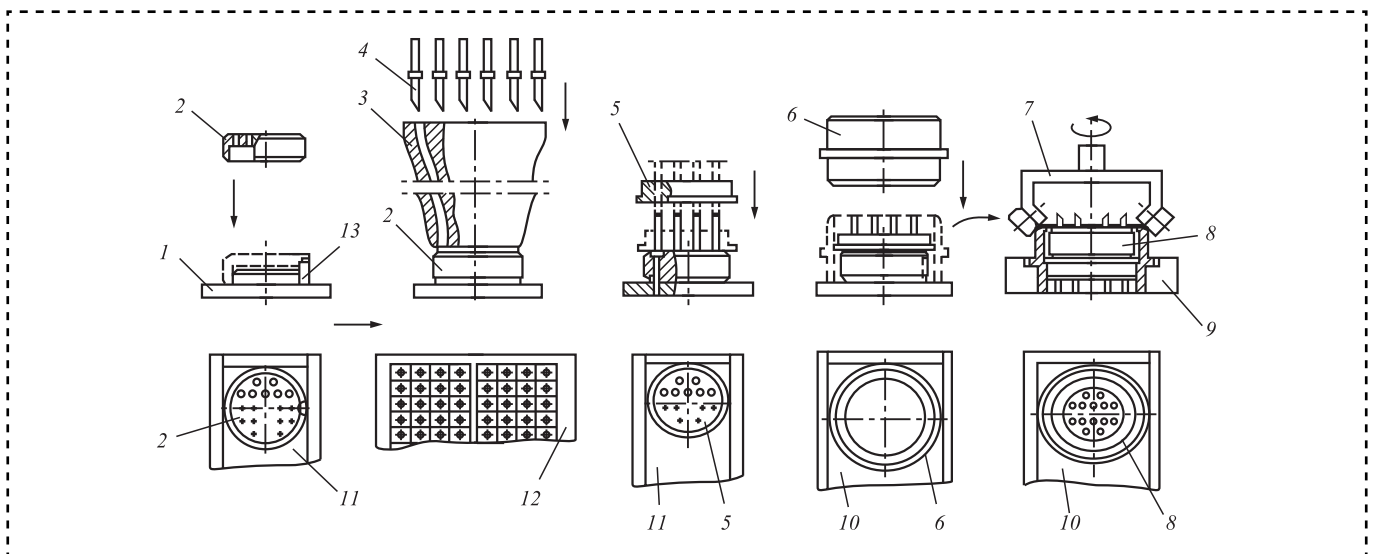
На второй и третьей операциях робот со специальным групповым захватом подает из кассеты 12 пакет из 32 контактов 4 (штырей) и загружает их в каналы распределителя 3, размещенного над изолятором 2. Каналы в нижней части распределителя расположены точно в соответствии со схемой сборки данного пакета. Перемещение штырей по каналам распределителя и загрузка их в гнезда изолятора происходит под действием силы тяжести и вибрации. Направленная вибрация и специальная конструкция транспортного спутника обеспечивают угловую ориентацию каждого штыря по лыске. На следующей позиции этих операций предусмотрен принудительный досыл штырей в гнезда изолятора с одновременным доворотом их вокруг оси.

После позиции досыла проводится контроль полноты набора пакета штырей. В случае



**Рис. 2. Контактные пакеты миниатюрных электросоединителей (а, б) и комбинированного пакета (в) с контактами двух типов:**

1 — контактный элемент большого диаметра; 2 — контактный элемент малого диаметра; 3 — изолятор



**Рис. 3. Технологическая схема сборки контактных пакетов миниатюрных электросоединителей типа 2PM:**

1 — транспортный спутник; 2 — основной изолятор; 3 — распределитель; 4 — контактный элемент (штырь 32 шт.); 5 — прикрывающий изолятор; 6 — алюминиевый корпус; 7 — завальцовочная головка; 8 — собранный пакет; 9 — рейфер для транспортировки пакета без спутника; 10 — кассета для алюминиевых корпусов и собранных пакетов; 11 — кассета для прикрывающих изоляторов; 12 — кассета для контактных элементов; 13 — штифт в спутнике, фиксирующий изолятор 2 от поворота

отсутствия хотя бы одного штыря транспортный спутник с неполным пакетом перемещается с основной конвейерной ветви в изолятор брака. Дозагрузку штырей в изолятор и возврат спутника на конвейер осуществляет оператор.

Технологическая схема сборки позволяет выполнять на линии сборку пакетов комбинированных ЭС, у которых в один изолятор устанавливаются различные по диаметру контакты двух типов. Это существенно повы-

шает коэффициент технологической гибкости сборочной линии.

На четвертой операции робот забирает из унифицированной кассеты 11 прикрывающий изолятор 5 и устанавливает его на контактные штыри основного изолятора. Нанизывание прикрывающего изолятора на штыри проводится с помощью захвата в виде комплекта спиц, имитирующего контактный набор (на схеме показаны штриховой линией). При совмещении

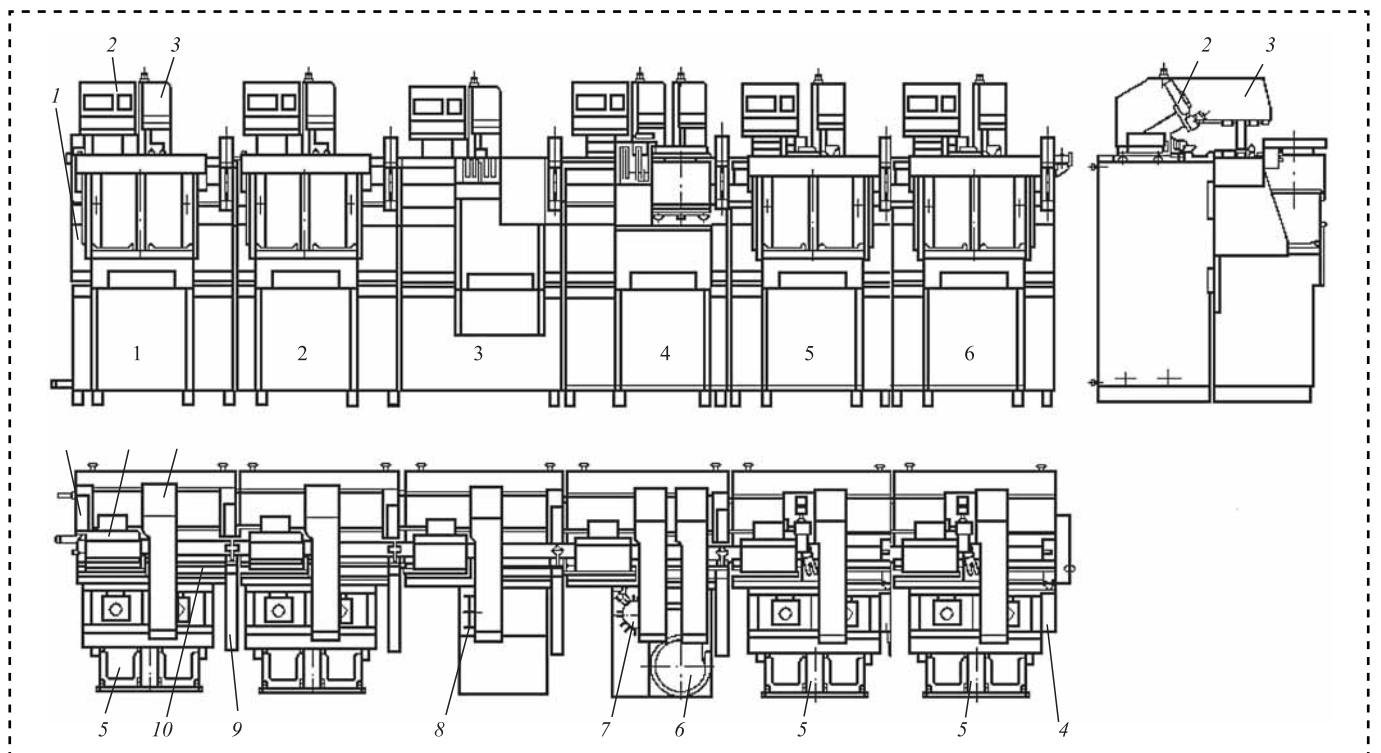
спиц со штырями изолятор сдвигается по ним как по направляющим и надевается на контактные штыри. На выходе модуля контролируется правильность посадки изолятора.

На пятой операции робот выгружает из кассеты 10 алюминиевый корпус 6 и надевает его на прикрывающий изолятор 5 пакета. В следующей позиции на этом модуле после контроля правильности посадки корпуса собранный узел выталкивается из транспортного спутника и кантуется на 180°. Свободный спутник сдвигается на возвратную ветвь конвейера и доставляется на первый модуль линии. На шестую операцию собранный узел 8 транспортируется на специальной площадке грейфера 9 без спутника.

На шестой операции с помощью специальной головки 7 с тремя роликами выполняется завальцовка пакета 8 загибанием кромки алюминиевого корпуса на фаску изолятора. С шестой операции собранный пакет 8 выгружается роботом в кассету 10, которая используется в кассетном накопителе для загрузки изделий на оборудовании участка контроля электропрочности и усилия расчленения.

Автоматизация сборочного производства ЭС может быть проведена на базе модульной линии, включающей шесть модулей (рис. 4). На *первом* модуле устанавливается основной изолятор в транспортный спутник. На *втором* и *третьем* модулях в распределитель загружается пакет контактов, которые западают в гнезда основного изолятора. На этих же модулях предусмотрен досыл штырей в гнезда изолятора с одновременным доворотом их вокруг оси. Параллельная загрузка контактных штырей на двух смежных модулях объясняется тем, что время перемещения тактового конвейера на один шаг значительно меньше времени цикла загрузочного робота с групповым захватом. Поэтому на каждом из двух модулей пакеты штырей загружаются через один изолятор (т.е. с пропуском одного шага). Таким образом, после второго модуля изоляторы с контактными наборами располагаются на транспортере через один, а после третьего модуля — сплошным потоком.

На *четвертом* модуле на контактные штыри основного изолятора устанавливаются прикрывающий изолятор. На *пятом* модуле на собранный контактный пакет надевается алюми-



**Рис. 4. Модульная линия сборки контактных пакетов миниатюрных электросоединителей типа 2РМ:**

1 — базовый модуль; 2 — пульт управления; 3 — загрузочный робот; 4 — устройство передачи спутников на параллельную ветвь транспортной системы; 5 — накопитель плоских кассет; 6 — БЗУ; 7, 8 — магазины стержневых кассет; 9 — лоток изолятора брака; 10 — тактовый конвейер

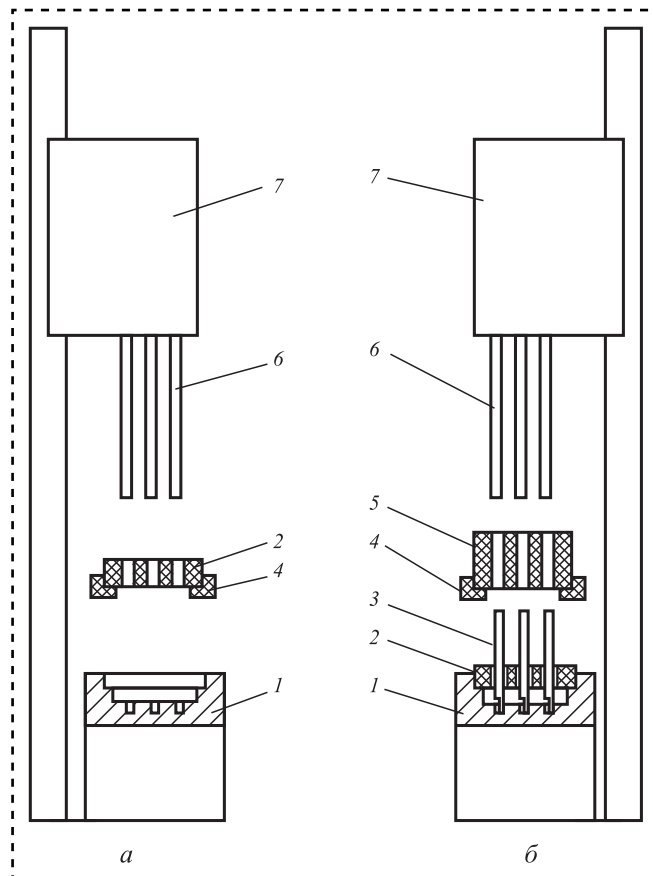
вый корпус, после чего проводится кантование его на  $180^\circ$ . На *шестом* модуле выполняется завальцовка алюминиевого корпуса.

При переналадке сборочной линии с одного типа ЭС на другой или на различные пакеты ЭС одного типа замене подлежат в первую очередь узлы транспортно-накопительной системы, в частности, транспортные спутники и кассеты (только по конфигурации внутренних гнезд), некоторые захваты загрузочных роботов, распределители контактов в позициях набора и т.п.

На рис. 5 даны принципиальные схемы устройств для установки основного и прикрывающего изоляторов контактного пакета. При укладке основных изоляторов 2 в гнезда кассеты 1 (рис. 5, а) с фиксацией их по угловой координате центрирующие стержни 6 головки 7 пронизывают основной изолятор 2 и входят в соответствующие отверстия гнезд кассеты 1. Далее разводятся опоры 4, включается вибрация и изолятор опускается по стержням в гнездо кассеты.

Прикрывающий изолятор 5 размещается над пакетом контактов 3, установленных в гнезда основного изолятора 2 и зафиксированных от поворота в пазах кассеты 1 (рис. 5, б). Для гарантированного надевания прикрывающего изолятора на пакет контактов используется инструментальная головка 7 с приводом вертикального хода. В головке 7 закреплен пакет стержней 6, расположение которых в точности соответствует расположению гнезд в прикрывающем изоляторе 5, после фиксации которого над собираемым пакетом контактов 3 головка 7 опускается, стержни 6 входят в гнезда изолятора 5, дополнительно центрируя его.

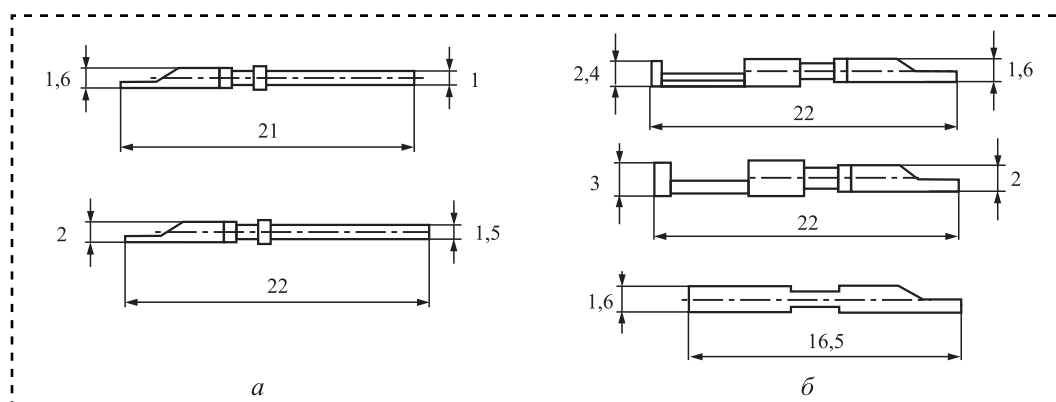
Ориентация цилиндрических контактных элементов (рис. 6) с явно выраженным смещением центра масс проводится на ножевой опоре (рис. 7).



**Рис. 5. Принципиальные схемы установки основного изолятора в гнездо кассеты (а) и прикрывающего изолятора (б) на пакет контактов:**

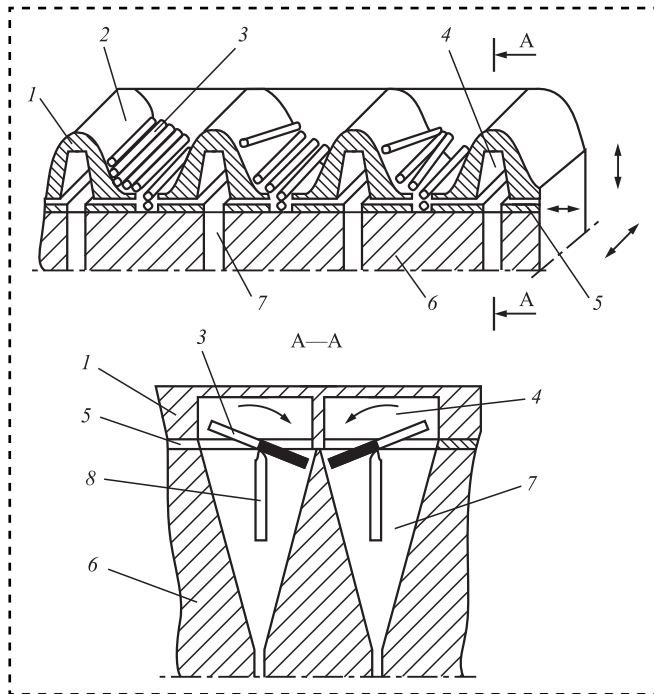
1 — кассета; 2 — основной изолятор; 3 — контактный элемент; 4 — разводящиеся опоры; 5 — прикрывающий изолятор; 6 — пакет стержней; 7 — головка со стержнями

Автоматизированная установка кассетирования контактов состоит из верхнего бункера 2 с виброприводом 3, нижнего бункера 4 с ориентатором 8 и распределителем 9 и механизма 10 шагового перемещения кассеты 11 (рис. 8). Блок, состоящий из нижнего бункера, ориентатора



**Рис. 6. Конструкции цилиндрических контактных элементов ЭС:**

а — штыри; б — гнезда



**Рис. 7. Схема ориентации цилиндрических контактных элементов ЭС со смещенным центром масс:**

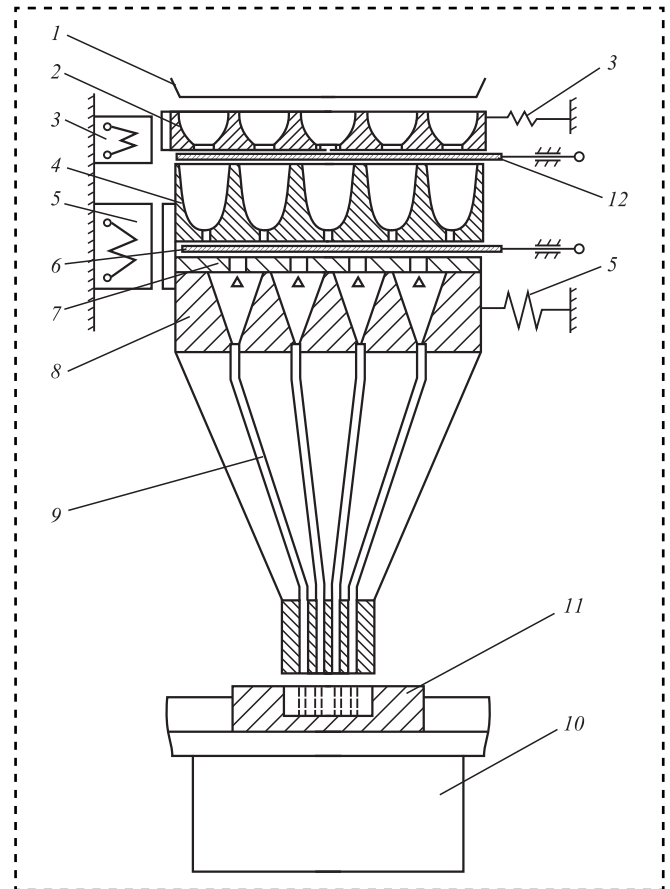
1 — нижний бункер с ячейками 2; 3 — контактные элементы; 4 — вырез; 5 — отсекатель; 6 — распределитель с каналами 7; 8 — ножевая опора

и распределителя, соединен с виброприводом 5. Шаблон 1, устанавливаемый над верхним бункером 2 при первичной загрузке деталей, служит для распределения контактов по ячейкам верхнего бункера в соответствии со схемой сборки.

Контактные элементы на сборку подаются загрузочным роботом с групповым механическим захватом (рис. 9). Групповой захват для контактов представляет собой матрицу 4 с набором втулок 3, в прорези которых установлены пружинные зажимы 6. Внутреннее отверстие втулок 3 рассчитано на максимальный диаметр контактных элементов 2. Это позволяет использовать групповой захват для подачи штырей и гнезд ЭС без переналадки. Конструкция пружинного зажима 6 обеспечивает надежное удержание контактов 2 во втулках 3 матрицы 4. Координационная сетка размещения втулок 3 на матрице захвата совпадает с сеткой размещения гнезд в кассете 1.

Последняя операция сборки контактного пакета ЭС — установка алюминиевого корпуса на пакет и завальцовка его кромки (рис. 10).

Сопряжение корпуса 4 с контактным пакетом 5 проводится по команде фотодатчика при завершении позиционирования захвата загрузочного робота и фиксации его над объектом 5. После надевания корпуса 4 на пакет 5 губки 3



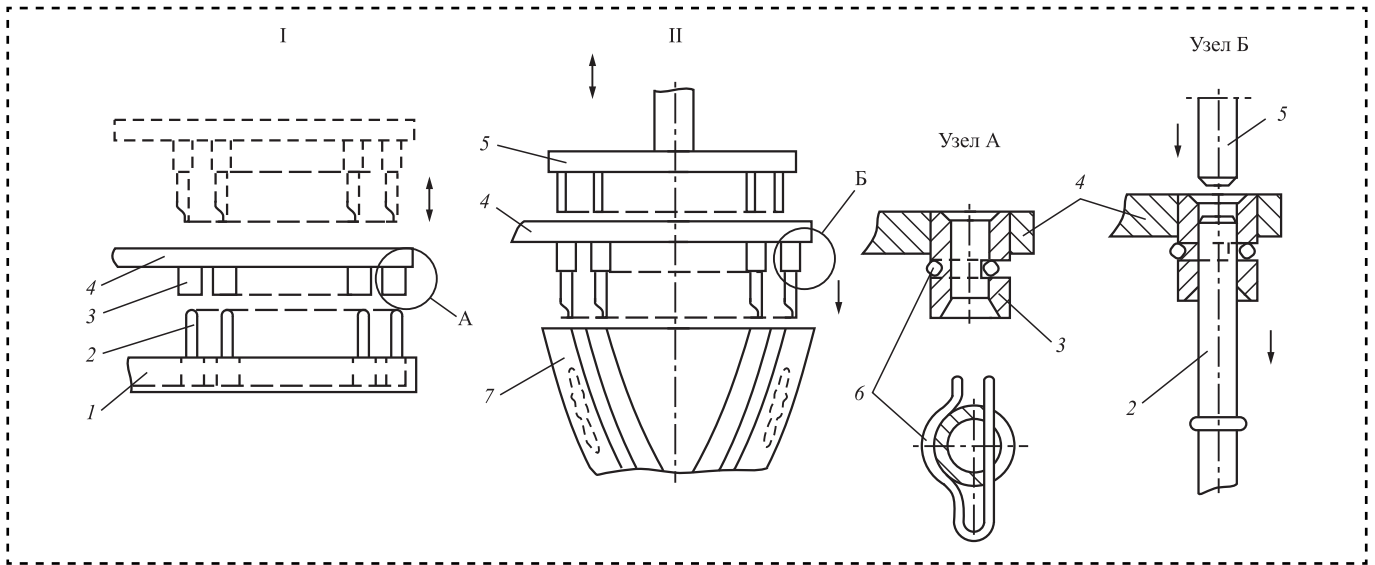
**Рис. 8. Схема установки кассетирования контактных элементов электросоединителей:**

1 — шаблон; 2 — верхний бункер с виброприводом 3; 4 — нижний бункер с виброприводом 5; 6 — отсекатель; 7 — шибер; 8 — ориентатор; 9 — распределитель; 10 — механизм шагового перемещения кассеты 11; 12 — заслонка

захвата разводятся и робот перемещается в зону кассеты за очередным корпусом. Так как операция завальцовки выполняется с нижней кромкой корпуса, которая загибается на фаску 2 основного изолятора, то дополнительной операцией перед завальцовкой оказывается операция кантования собранного пакета на  $180^\circ$ . Для этой цели специальный толкатель 8 поднимает пакет 5 над спутником 1, затем он фиксируется губками качающегося захвата 6. После фиксации захват 6 переворачивает собранный пакет 5 в вертикальной плоскости и устанавливает его в гнездо 7 на позиции завальцовки. В то же время толкатель 8 опускается и свободный спутник 1 передается на возвратную ветвь транспортного конвейера.

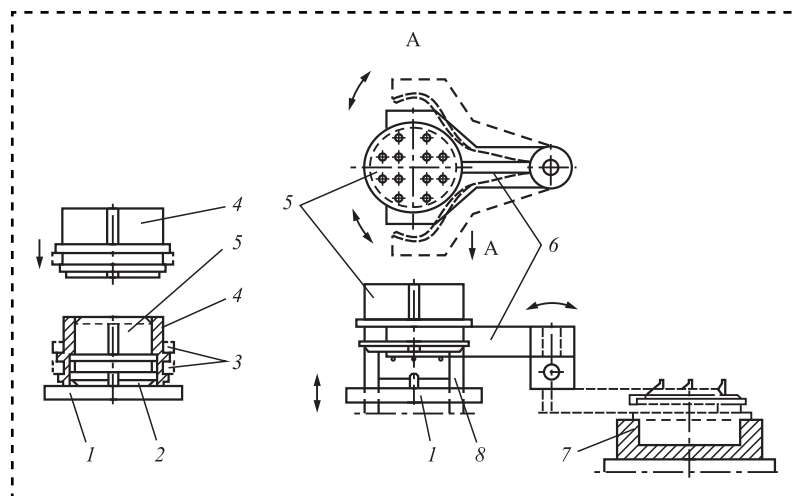
В отличие от ШР с цилиндрическими контактами сборку ламповых панелей рассмотрим с плоскими контактными элементами (рис. 11 на стр. 2 обложки).

Октябрьная ламповая панель содержит восемь плоских контактов вильчатого типа (рис. 12).



**Рис. 9. Схема подачи на сборку контактных элементов групповым захватом загрузочного робота:**

1 — кассета с контактными элементами 2; 3 — втулка; 4 — матрица с набором втулок; 5 — групповой выталкиватель; 6 — пружинный захват; 7 — распределитель



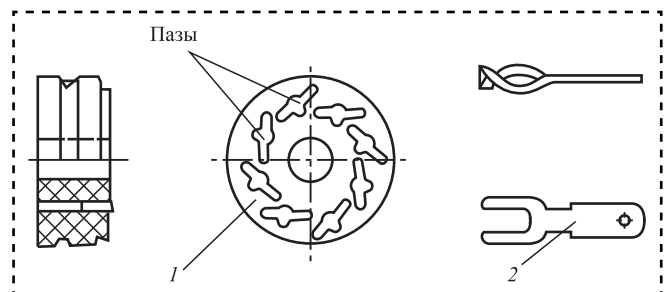
**Рис. 10. Схема сборки корпуса с контактным пакетом ЭС и кантования его в позицию завальцовки:**

1 — спутник; 2 — фаска на основном изоляторе; 3 — губки захвата робота; 4 — алюминиевый корпус; 5 — собранный контактный пакет; 6 — захват сборочного робота; 7 — гнездо на позиции завальцовки; 8 — толкатель

Линия сборки панелей включает два модуля с вибростендами (BC1, BC2) и загрузочный робот (ЗР) в качестве межоперационного транспортного средства (рис. 13). На линии предусмотрен оператор для выполнения специальной операции по доработке изделия.

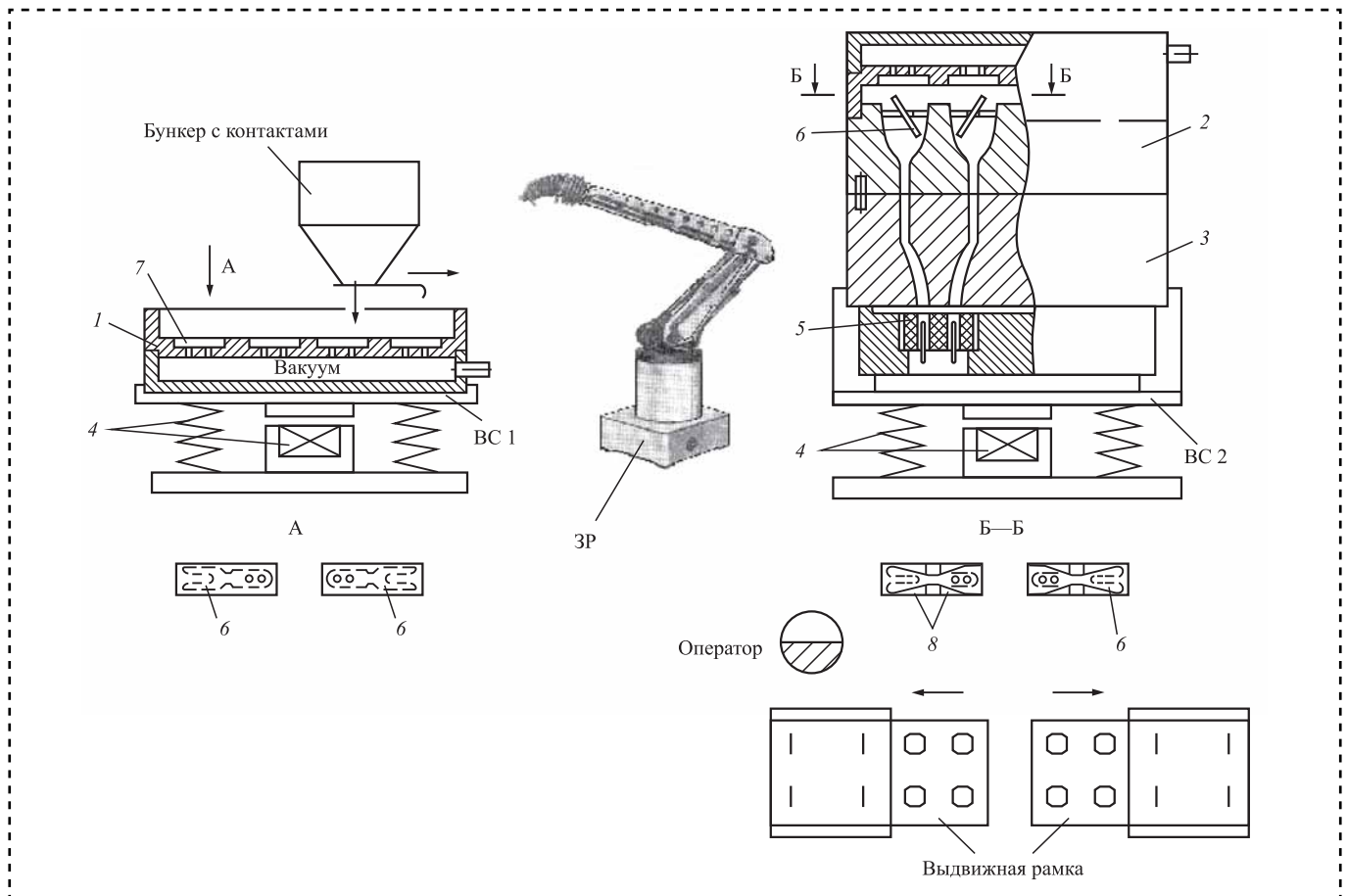
Последовательность операций на СЛ: оператор засыпает из бункера порцию плоских вильчатых контактов 6 на поверхность кассеты 1 вибростенда BC1 и включает электромагнитный привод 4 вынужденных колебаний. Под действием вибрации контакты распределяются

по кассете и западают в гнезда 7 вилкой влево и вправо примерно с равной вероятностью. При заполнении контактами гнезд кассеты 1 включается вакуум и отключается вибропривод. ЗР переносит кассету на второй модуль и кантует ее на 180°. За счет вакуума контакты в гнездах кассеты удерживаются, а остальные сыпаются во вспомогательную тару. Так происходит первичная ориентация контактов. В случае неполного заполнения гнезд оператор дозаполняет их контактами вручную. Кассета 1 с контактами совмещается с кассетой 2 на вибростенде BC2, вакуум отключается и включается второй вибропривод. Контакты из кассеты 1 на BC2 укладываются в гнезда кассеты 2, в которых они ориентируются вертикально вилкой вверх благодаря клиньям 8 в гнездах кассеты 2.



**Рис. 12. Керамическая октальная ламповая панель 1 и плоский вильчатый контакт 2**





**Рис. 13. Двухмодульная линия сборки октальной ламповой панели:**

BC1, BC2 — вибростенды; ЗР — загрузочный робот; 1 — кассета для первичной ориентации плоских вильчатых контактов; 2 — кассета для вторичной ориентации контактов (вилкой вверх); 3 — распределитель; 4 — вибропривод; 5 — ламповая панель; 6 — плоский вильчатый контакт; 7 — гнездо в кассете для контакта; 8 — клинья в гнезде кассеты для вторичной ориентации контактов

Кассета 2 состыкована с распределителем каналов 3, по которым контакты попадают в гнезда ламповых панелей 5, установленных в нижней кассете. Через определенное время оператор выключает вибропривод BC2, ЗР снимает пустую кассету 1 и переносит ее на BC1 первого модуля и снова кантует кассету на 180°. Оператор выдвигает рамку с кассетой с собранными ламповыми панелями и разгружает ее.

Пока работает вибропривод BC2, оператор устанавливает в выдвижную рамку новую кассету с пустыми ламповыми панелями. Когда работают оба вибростенда, оператор с помощью специального приспособления выполняет операцию скрутки на угол 20° нижней части контактов в собранных ламповых панелях в целях удержания их в гнездах.

В данной системе реализован метод кассетной сборки, позволяющий многократно увеличить производительность труда.

## Заключение

Представлены технологические схемы сборки контактных пакетов электрических соединителей, модульная сборочная линия и оборудование для автоматизации процессов манипулирования объектами. Оригинальными являются предложенные схемы и конструкции группового манипулирования контактными элементами двух типов, обеспечивающие значительное повышение производительности труда на сборке.

## Библиографический список

1. **Иванов А.А.** Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки: учеб. пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
2. **Иванов А.А.** Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: ФОРУМ, 2018. 336 с.
3. **Иванов А.А.** Проектирование систем автоматизированного машиностроения: учебник. М.: ФОРУМ, 2013. 298 с.

П.А. Головкин, канд. техн. наук (АО "Плутон", Москва)  
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru; тел.: (495) 730-36-19

## Повышение качества обоймы ротора стартера-генератора с применением ковочных операций

*Приведен пример использования ковочных операций как средства повышения качества и упрощения процесса изготовления обоймы ротора перспективного стартера-генератора. На основе анализа характеристик листового и кованого материалов показано, что обеспечение ненаправленной структуры материала поковки позволит ограничить явление текстурного разупрочнения и развитие ползучести в процессе работы обоймы ротора из титанового сплава.*

*An example of usage of forging operation described as effective tool for increasing of quality and simplification of the manufacturing process of the cage of rotor of perspective starters-generators. The providing of non-directional structure of the forging's material should give the opportunity of restriction of textural softening and the growth of the creep during the operation of the cage of rotor made of titanium alloy.*

**Ключевые слова:** стартер-генератор, обойма ротора, титановые сплавы, кольцевые заготовки, холоднокатаный лист, текстурное разупрочнение, нагрузки при вращении ротора, развитие ползучести, блоки скольжения, обойма, разрушение стартера-генератора, титановые поковки, структура поковок.

**Keywords:** starter-generator, cage of rotor, titanium alloys, ring billets, cold-rolled sheet, textural softening, loads of the cage during the rotation of rotor, creep development, slip blocks, clip, destruction of starter-generator, titanium forgings, structure of forgings.

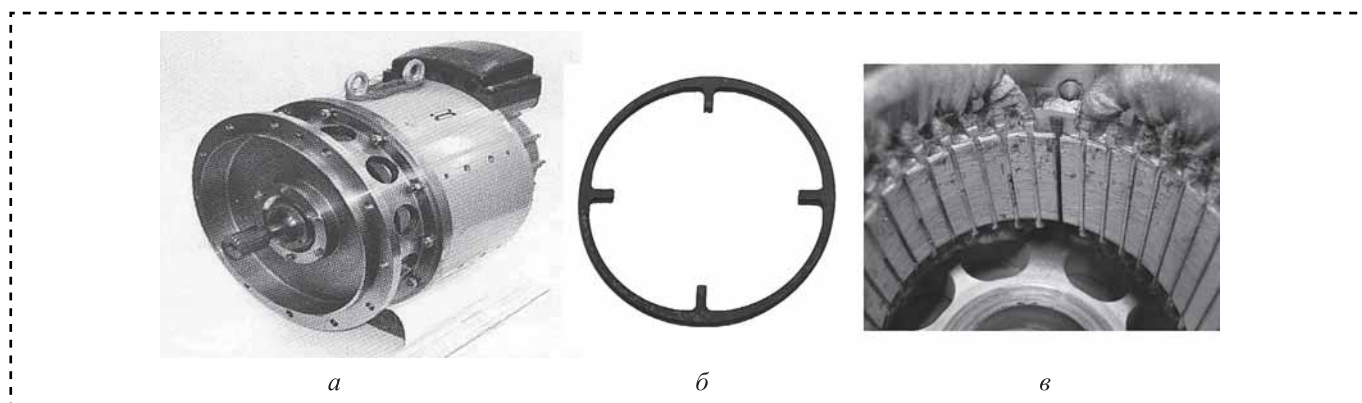
### Введение

К стартерам-генераторам изделий новой техники предъявляют жесткие требования в части надежности в работе, габаритных размеров и массы, а также качества используемых материалов, которые при минимальной массе должны обеспечить работу при частоте вращения ротора до  $30\,000\text{ мин}^{-1}$  и минимальном магнитном зазоре (рис. 1). В таких условиях нагрузку, близкую к пределу конструктивной прочности, несет такая ответственная часть стартера-генератора, как обойма его ротора [1, 2]. По сумме характеристик в конструкциях стартеров-генераторов находят применение и титановые сплавы, включая классический высокопрочный сплав ВТ14 [3]. Однако конструкция и базовые технологические процессы изготовления ответственных деталей не в полной мере согласуются с характеристиками и свойствами применяемых материалов.

Так, испытания опытного образца перспективного стартера-генератора показали, что конструкция обоймы ротора не обеспечивает расчетной прочности. В частности, имело место текстурное разупрочнение материала колец обоймы, вследствие развития процесса ползучести [16], вызвавшее изменение ее размеров и величины магнитного зазора [1, 2]. Это могло привести к саморазрушению стартера-генератора и выхода из строя изделия, в которое он будет входить. Целесообразно пересмотреть базовые конструктивные и технологические решения с учетом конструкторских наработок и анализа современных материалов [1–3].

### Базовый технологический процесс изготовления обоймы ротора

Исходной конструкцией перспективного авиационного стартера-генератора предусмотрено изготовление обоймы ротора в виде на-



**Рис. 1. Внешний вид стартера-генератора (а), одинарной кольцевой заготовки (б) и обмотки статора, поврежденные деформированной обоймой ротора (в)**

борной детали, представляющей собой пакет из 100 кольцевых заготовок наружным диаметром 88 мм, полученных методом вырубки из исходного листа сплава ВТ14 номинальной толщиной 1 мм [4, 5].

Листовой прокат характеризуется обусловленной технологией его получения неравномерностью [4, 5]. Элемент набора обоймы ротора вырезают из холоднокатаного титанового листа шириной 400 мм. Ввиду значительного количества заготовок в пакете ротора (100 штук), даже допустимое отклонение по толщине приводит к их неплотному прилеганию между собой и к перекосам заготовок в сборке [5].

Исходный лист рубят на полосы шириной 100 мм. Разнотолщинность исходного листа приводит к перекосу колец в собранном пакете ротора, а также к тому, что число колец в сборке обычно колеблется от 97 до 102. Образующийся при вырубке колец заусенец удаляют вручную на ленточно-шлифовальной машине, поскольку их геометрия исключает групповую зачистку.

Для снижения уровня напряжений, привносимых в заготовки при их вырубке, применяют отжиг в электрической (не вакуумной) печи в среде инертных газов, оказывающий негативное влияние с точки зрения газонасыщения и изменения характеристик металлического материала. Поверхность отожженных колец покрывает характерный для сплава ВТ14 темно-бурый альфирированный слой (см. рис. 1), существенно ухудшающий их прочностные характеристики [6].

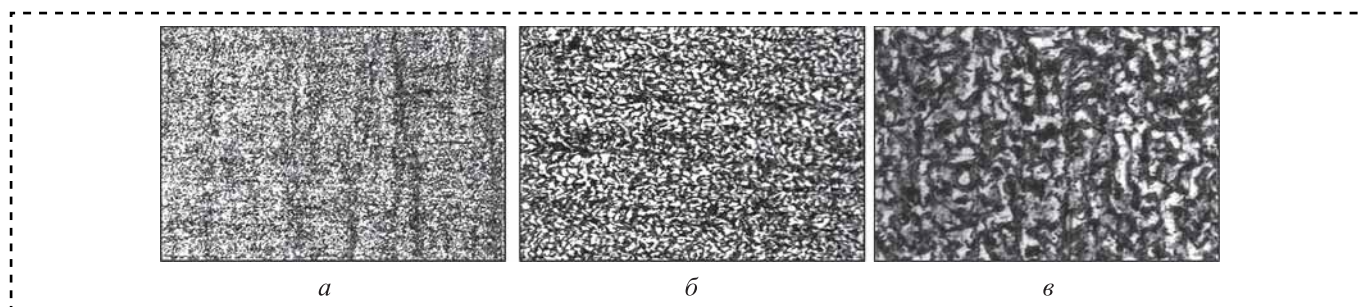
После ручной зачистки кольца укладывают по одному в специальное приспособление и скрепляют между собой клеем ВК9, далее

проводят сушку заневоленного пакета колец и его совместную механическую доработку. Контролируют размеры полученной обоймы, состояние ее поверхности, проверяют отсутствие щелей и перекоса между составляющими ее кольцами и т.д.

Только после этого обойму передают в дальнейшее производство как часть ротора стартера-генератора. Технологический процесс сопровождается рядом операций сборки-разборки, зачистки, промывки в спиртобензиновой смеси и др. Таким образом, базовый технологический процесс отличается высокой сложностью, низкой производительностью, наличием вредных и опасных факторов, а также плохой повторяемостью ввиду разнотолщинности исходного листа. Почти все операции являются ручными и с учетом малой серийности изделий не могут быть автоматизированы.

#### **Характер потери устойчивости обоймы ротора и анализ его причин**

В процессе испытания стартера-генератора при номинальных оборотах  $36\ 000\ \text{мин}^{-1}$  выявлено искажение геометрии наборной обоймы ротора, которое могло привести к зацеплению обоймы и обмотки статора (см. рис. 1) и разрушению стартера-генератора. Исходная микроструктура колец является типичной для холоднокатаного листового сплава ВТ14 и представлена ориентированными в направлении проката мелкими глобулярными зернами. В то же время подвергшиеся деформации при испытании кольцевые заготовки имеют измененную структуру, и сечение кольца разбито на близкие к квадратным либо ромбическим блоки,



**Рис. 2. Блоки скольжения в микроструктуре кольца обоймы ротора:**

*a* —  $\times 100$ ; *б* —  $\times 250$ ; *в* —  $\times 500$

содержащие 7...8 зерен на сторону (рис. 2). Такой характер структуры свидетельствует о взаимном перемещении микрообъемов материала колец путем комбинации блокообразования, зернограницного скольжения, а также внутризеренного скольжения и двойникования [7].

Скольжение в  $\alpha$ -титане с ГПУ-решеткой протекает преимущественно по призматическим плоскостям  $\{10\bar{1}0\}$  и в меньшей степени по пирамидальным плоскостям  $\{10\bar{1}1\}$  и плоскости базиса (0001); в  $\beta$ -титане с ОЦК-решеткой скольжение протекает по плоскостям  $\{110\}$  и  $\{112\}$  в направлении наибольшей плотности упаковки атомов  $\{111\}$ . Двойникование в  $\alpha$ -титане протекает по плоскостям  $\{10\bar{1}2\}$ ,  $\{11\bar{2}1\}$ ,  $\{11\bar{2}2\}$ ,  $\{11\bar{2}3\}$  и  $\{11\bar{2}4\}$ , а в  $\beta$ -титане по плоскостям  $\{110\}$  и  $\{112\}$  в направлении плоскости наибольшей упаковки [8, 9].

Соответственно, текстурное упрочнение отвечает расположению плоскости базиса с ГПУ ( $\alpha$ -фаза) и ОЦК ( $\beta$ -фаза) решеткой параллельно поверхности нагружения. В  $\alpha$ -титане наиболее легкие системы скольжения в плотноупакованном направлении  $\{11\bar{2}0\}$  параллельны плоскости базиса и не дают сдвига в направлении нагружения, активизируя этим системы с более высокими критическими напряжениями сдвига. В результате разрушающая нагрузка на 9...12 % превышает аналогичный показатель при одноосном растяжении [9]. При смене направления нагружения имеет место аналогичное текстурное разупрочнение, которое наблюдается при направлении нагружения под углом  $45^\circ$  к плоскостям скольжения и является предпосылкой для развития явления ползучести [9, 10]. Так, для сплава ОТ4-1 с разориентировкой колоний  $\alpha$ -фазы (пластин с  $\beta$ -прослойками толщиной до 0,1 мкм) менее  $1^\circ$ , скорость ползучести в 1000 раз превышает таковую при разориентировке около  $12^\circ$  [11].

Особенность сборной конструкции обоймы ротора — торцевая поверхность составляющих колец несет на себе следы от вырубki, и срез

от каждого из колец представлен зоной вязкого и хрупкого разрушения. Процесс вырубki глубоко изменяет структуру и свойства близлежащего к торцам металлического материала, при этом глубина измененного слоя заготовки сравнима с ее толщиной [12].

Это значит, что при ширине кольца набора обоймы ротора 2,5 мм, около 1 мм с внешней и с внутренней поверхности среза обладают измененными структурой и свойствами, отличными от структуры и свойств материала исходного листа, которые являлись расчетными при проектировании стартера-генератора [4, 5]. То есть полученный из листовых заготовок набор обоймы ротора изначально не может соответствовать расчетным данным, и если дефекты наружной поверхности сборной обоймы могут быть устранены механическим путем, то изменение структуры материала колец практически необратимо. В результате материал колец обоймы изначально исчерчен насыщенными газами зародышей трещин, а также имеет существенный альфирванный слой [6, 11, 13]. В вершинах трещин почти всегда имеет место повышенное содержание внедренных газовых примесей [11, 13]. Как результат, образование локальных зон пониженной пластичности и повышенных внутренних напряжений вызывает в металлическом материале блокообразование, сопровождающееся микродеформацией по плоскостям наибольших касательных напряжений и развитием процесса ползучести [7, 8, 10]. Следы блокообразования и ползучести под нагрузкой материала колец обоймы, изготовленных из листовых заготовок сплава ВТ14, отчетливо видны на рис. 2.

Из перечисленных фактов следует, что базовый технологический процесс получения обоймы ротора не только приводит к снижению свойств ее материала, текстурному разупрочнению и развитию ползучести, но и отличается сложностью и длительным циклом изготовле-



ния, требует многочисленной оснастки, проведения множества вспомогательных операций с высокой долей ручного труда.

Должен быть разработан новый технологический процесс изготовления обоймы ротора, который решил бы вопрос текстурного разупрочнения титановой обоймы и был бы по возможности прост и дешев. Для исследуемого типа стартеров-генераторов может быть применена обойма ротора, выполненная из единой заготовки [1, 2]. Однако использование в качестве заготовки прутков и труб непригодно, поскольку их материал имеет способствующую текстурному разупрочнению и не соответствующую высотному направлению нагружения при работе ротора направленную структуру. Для получения ненаправленной структуры материала заготовки необходимо применение ковочных операций, ковка исходного прутка [14].

Использование в качестве заготовки одной поковки взамен 97...102 колец упростит и удешевит технологический процесс изготовления обоймы ротора. На поверхности единой кованой заготовки не будет характерных для получаемых методом вырубki колец сколов и отличающихся от расчетных прочностных характеристик глубоко измененного материала в области среза кольца [12]. Использование поковки с ненаправленным строением ее материала позволит привести в соответствие расчетные и фактические характеристики материала обоймы, более точно прогнозировать поведение материала деталей стартера-генератора в процессе его работы.

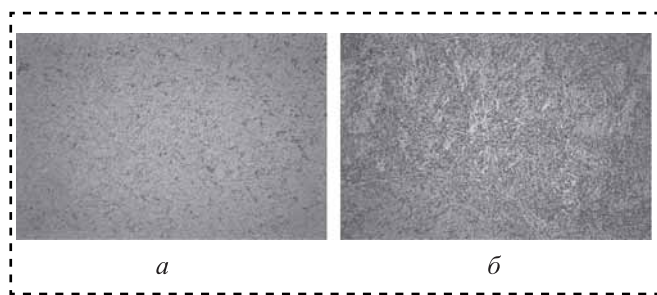
В качестве материала для изготовления кованой обоймы ротора использовали комплексно-легированный ( $\alpha + \beta$ )-сплав ВТ23, для которого температура нагрева под ковку на молотах составляет 880...910 °С с окончанием ковки при температуре не менее 760 °С [15]. Полиморфное превращение ( $\alpha + \beta$ )  $\leftrightarrow$   $\beta$  протекает при температурах  $T_{п.п.ВТ23} = 900...940$  °С; интервал рекри-

сталлизации сплава — 850...880 °С, температура завершения ковки на молотах — 760 °С [16]. Для обеспечения ненаправленной структуры материала поковки с близким уровнем механических свойств в различных направлениях и слабо подверженного текстурному разупрочнению. Нагрев заготовок перед ковкой осуществляли в атмосферных электрических печах. Для стабилизации свойств и снятия напряжений поковки подвергали закалке на воду с 780...800 °С и далее старению при 450...550 °С в течение 4 ч [14, 17].

Использование поковок качественно уменьшит негативное газонасыщение металлического материала относительно листовых заготовок. Важно, что структура сплава ВТ23 представлена в основном мартенситной  $\alpha$ -фазой с содержанием  $\beta$ -фазы примерно 30 %, при том, что сплав ВТ14 содержит ее около 10 % [15]. Этот показатель свидетельствует в пользу сплава ВТ23 с точки зрения распределения газовых примесей между фазами и по границам зерен и снижения разности в уровне прочности между фазами  $\beta$  и  $\alpha$  [18]. Большее содержание фазы  $\beta$  в сплаве ВТ23 облегчает переход в процессе охлаждения металлического материала растворенного в нем водорода из  $\alpha$ - в  $\beta$ -фазу, и тем уменьшает образование хрупкого гидрида титана  $TiH_4$  в  $\alpha$ -колониях [6, 13]. В результате обеспечивается более равномерное распределение нагрузок на разнофазный металлический материал, что препятствует их локализации и развитию блокообразования и ползучести. Комплексное легирование сплава ВТ23 сближает характеристики прочности и пластичности  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, ограничивая текстурное разупрочнение [6, 13, 18].

Основной объем материала поковки представлен микроскопической ненаправленной ( $\alpha + \beta$ )-структурой с размером зерна 3...5 мкм (рис. 3, а) [19]. В центральных областях поковки, где ее материал будет удален в процессе механической обработки, зерно крупнее, и представлено пластинчатой микроструктурой, однако размеры зерен и тип структуры вполне допустимы (рис. 3, б). Комплексно-легированный сплав ВТ23 устойчив к образованию искаженных фаз, и его технологичность качественно выше, чем у титановых сплавов первого поколения, таких как ВТ14 [15, 20].

Важно, что получаемая структура сплава ВТ23 имеет тетраэдрическое строение (рис. 3, а), и колонии  $\alpha$ -фазы заполняют объем поковки подобно тому, как тетраэдрические молочные пакеты заполняют тарные ящики. Именно отсутствие направленности структуры позволяет ограничить такой недостаток классических титановых спла-



**Рис. 3. Микроструктура поковок из сплава ВТ23,  $\times 400$ :**  
а — основной объем материала поковки; б — центральная область поковки



вов, как склонность к текстурному разупрочнению и ползучести [8, 11].

Получение ненаправленной структуры деформированного сплава ВТ23, ввиду ограничения текстурного разупрочнения, позволит повысить прочность материала деталей типа обоймы на 8...12 %, без учета изначально более высоких прочностных характеристик относительно сплава ВТ14, а также будет препятствовать развитию ползучести материала обоймы под нагрузкой в процессе эксплуатации [3, 8, 15].

### Выводы

1. Изначальный конструктив наборной обоймы стартер-генератора с использованием в качестве заготовок листового материала из сплава ВТ14 не учитывает явления текстурного разупрочнения, особенно характерного для классических титановых сплавов. В результате реальные прочностные показатели материала обоймы ротора в направлении нагружения на 9...12 % уступают расчетным, и в процессе работы генератора имеет место ползучесть металлического материала, грозящая зацеплением обоймы об обмотки статора, разрушением стартера-генератора и выходом из строя изделия, на которое он установлен.

2. Назначение и конструктив перспективного стартера-генератора позволяют изготавливать обойму ротора не в сборном виде из 100 листовых заготовок, а из получаемой ковкой исходного титанового прутка единой заготовки, существенно упростив производственный процесс и качественно улучшив его повторяемость.

3. Применение ковочных операций для получения ненаправленной структуры ограничивает свойственное для листов из титановых сплавов текстурное разупрочнение, приближая прочностные показатели к расчетным, и препятствуя его ползучести под нагрузкой.

4. Внедрение ковочной заготовки из комплексно-легированного титанового сплава ВТ23 взамен используемого для получения листовых заготовок сплава ВТ14 повысит конструктивную прочность обоймы ротора ввиду более высокого уровня его прочностных характеристик.

5. Использование в качестве материала обоймы ротора сплава ВТ23 с содержанием  $\beta$ -фазы примерно 30 % взамен сплава ВТ14 с около 10 %  $\beta$ -фазы благотворно сказывается на распределении газовых примесей по границам зерен и фаз и уменьшении разности в уровне прочности между фазами  $\beta$  и  $\alpha$ , как следствие — на ограничении блокообразования и ползучести материала обоймы ротора под нагрузкой.

6. Получение равномерной мелкозернистой ненаправленной структуры с тетраэдрическим переплетением  $\alpha$ -колоний без ярко выраженных границ  $\beta$ -зерен обеспечивает ковка обоймы ротора из сплава ВТ23 с нагрева до температуры 880 °С.

### Библиографический список

1. **Константинов В.Д., Уфимцев И.Г., Козлов Н.В.** Авиационное оборудование самолетов. М.: Воениздат, 1970. 339 с.
2. **Лебедев А.А.** Автоматическое и электрическое оборудование летательных аппаратов. М.: Воениздат, 1979. 383 с.
3. **Колачев Б.А., Польшкин И.С., Талалаев В.Д.** Титановые сплавы разных стран: справ. М.: ВИЛС, 2000. 316 с.
4. **ОСТ 1.90218—76.** Листы из титановых сплавов. Технические требования. М.: ВИАМ, 1976. 12 с.
5. **ГОСТ 22178—76.** Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2005. 15 с.
6. **Влияние** температуры нагрева на изменение концентрации газов в поверхностном слое поковок сплава ОТ4 / В.И. Кулаков и др. // *Алюминиевые и специальные сплавы*. Вып. 4. М.: ВИАМ, 1968. 340 с.
7. **Богатов А.А.** Механические свойства и модели разрушения металлов: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2002. 329 с.
8. **Текстура** и конструкционная прочность сферических сосудов давления из сплавов титана / С.Я. Бецофен и др. // *Авиационная промышленность*, 2006. № 4. С. 26—32.
9. **Фрост Г. Дж., Эшби М.Ф.** Карты механизмов деформации / пер. с англ. Л.М. Бернштейна. Челябинск: Металлургия, 1989. 328 с.
10. **Розенберг В.М.** Ползучесть металлов. М.: Металлургия, 1967. 276 с.
11. **Евланов Н.Г., Сахаров Г.С.** Зависимость структуры и свойств заготовок из титановых сплавов от температуры деформации // *Труды МАТИ. Обработка давлением авиационных материалов*. 1968. Вып. 69. 195 с.
12. **Романовский В.П.** Справочник по холодной штамповке. М.: Машиностроение, 1979. 520 с.
13. **Влияние** содержания водорода на чувствительность к трещине и замедленное разрушение сплавов ОТ4 и ОТ4-1 / Т.М. Федорова и др. // *Алюминиевые сплавы и специальные материалы*. 1973. Вып. 7. С. 31—36.
14. **ОСТ 1.90266—86.** Прутки катаные крупногабаритные из титановых сплавов. Технические условия. М.: ВИАМ, 1976. 7 с.
15. **Хорев А.И.** Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов. М.: Воениздат, 1979. 256 с.
16. **Ковка** и штамповка титановых сплавов: ПИ1.2.108-79. М.: ВИАМ, 1979. 17 с.
17. **Термическая** обработка полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов: ПИ 1.2.587-02. М.: ВИАМ, 2002. 30 с.
18. **Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А.** Структура и свойства авиационных сталей и сплавов // *Труды МАТИ. Распределение водорода между фазами в ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавах*. 1966. Вып. 66. 184 с.
19. **Инструкция** ВИАМ № 1054-76. Металлографический анализ титановых сплавов. М.: ВИАМ, 1976. 14 с.
20. **Трещиностойкость** поковок из титанового сплава ВТ23 / В.И. Галкин и др. // *Технология металлов*. 2013. № 8. С. 9—13.

# ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.941.1-529:629.73

DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-6-255-261

**М.Ш. Мигранов**, д-р техн. наук, **А.М. Мигранов**

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

E-mail: migmars@mail.ru, migranov\_art\_1993@inbox.ru

## Исследование нестационарности при точении жаропрочных сталей и сплавов

*Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований контактных явлений при лезвийной обработке резанием на основе термодинамики неравновесных процессов и с позиций самоорганизации трибосистемы. Разработанная термодинамическая модель лезвийной обработки при переменных режимах резания (нестационарность) позволяет минимизировать износ режущего инструмента и в целом повысить эффективность производства за счет ускорения привода главного движения металлорежущего станка.*

*The results of theoretical and experimental studies of contact phenomena in blade cutting based on the thermodynamics of non-equilibrium processes and from the standpoint of self-organization of the tribosystem are presented. The developed thermodynamic model of blade processing with variable cutting modes (non-stationary) allows to minimize the wear of the cutting tool and generally increase production efficiency by accelerating the drive of the main movement of the metal-cutting machine.*

**Ключевые слова:** резание металлов, нестационарность, износостойкость, температура и силы резания, вторичные структуры, диссипативная функция, пластическая деформация.

**Keywords:** metal cutting, unsteadiness, wear resistance, temperature and cutting forces, secondary structures, dissipative function, plastic deformation.

### Введение

В условиях высокоскоростной обработки деталей сложной конфигурации, с большой торцевой и продольной протяженностью, из труднообрабатываемых сталей и сплавов трудно обеспечить износостойкость режущего инструмента в пределах одного технологического прохода. Для обеспечения соответствующих показателей качества поверхностного слоя нельзя проводить замену изношенного режущего инструмента. Поэтому остро встает проблема обеспечения работоспособности (износостойкости) режущего инструмента.

Особенность применения и эксплуатации режущих инструментов на современном металлорежущем оборудовании, оснащем системах числового программного (ЧПУ) и адаптивного управления (АДСУ) — переменность многих параметров процесса лезвийной обработки. Такие операции, как многопере-

ходная обработка, обработка сложных контуров по копиру, торцевое, вибрационное и прерывистое точение выполняются при переменных элементах режима резания и как следствие — при нестационарности температурно-силовых условий нагружения режущего инструмента. Значительный вклад в нестационарность лезвийной обработки и, в частности, контакта "инструмент—деталь", вносят как внешние факторы — колебание припуска заготовок и их физико-механическая неоднородность, биения и вибрации, переменность технологических параметров процесса точения (скорость, подача и глубина резания), так и внутренние, связанные с изменением сил и температур в зоне резания вследствие трения и необратимого роста износа режущего инструмента [1—4].

Практические рекомендации, используемые в промышленности, возможную нестационарность учитывают поправочными коэффициентами на уменьшение режимов обработки или не

учитывают совсем, что приводит к снижению производительности и в большинстве случаев не обосновано [5–7].

Большое разнообразие новых материалов, обладающих повышенными прочностными свойствами, необходимость сокращения сроков их освоения и повышения общей эффективности эксплуатации режущего инструмента выдвигает в число актуальных задач разработку методик теоретического исследования нестационарного течения в целях определения функционально-математических моделей характеристик обрабатываемости, пригодных для решения вопросов оптимизации и управления процессом резания в различных технологических условиях, основанных на взаимосвязи переменных элементов режима резания с контактными явлениями при лезвийной обработке.

В процессе резания вследствие изнашивания инструмента происходит непрерывное изменение пространственной формы контактных поверхностей. Это даже при постоянных значениях элементов режима резания может привести к изменению распределения напряжений и температур в зоне фактического контакта, в свою очередь влияющих на интенсивность изнашивания [1, 5, 6]. Таким образом, изнашивание контакта и распределение удельных нагрузок и температур — взаимообусловленные процессы, что необходимо учитывать при разработке аналитических зависимостей для расчета интенсивности износа при нестационарном резании.

В настоящее время общепринята комплексная теория трения и износа, объединяющая молекулярно-кинетический и структурно-энергетический подходы. Основная ее концепция заключается в необходимости многократного фрикционного воздействия для разрушения поверхностей трения. При этом процесс трения рассматривается как потеря механической энергии за период относительного движения соприкасающихся областей материалов. Разрушение (износ) происходит в результате накопления в деформируемом объеме внутренней энергии, затрачиваемой на образование дефектов кристаллической решетки трущихся тел и на повышение температуры их поверхностных слоев [1, 4, 8–10].

### Теоретико-экспериментальная гипотеза

На основе первого закона термодинамики для процессов трения и износа изменение

внутренней энергии  $\Delta W$  можно представить в виде

$$\Delta W = \Delta W_{mv} + \Delta W_{ph} + \Delta W_d + \Delta W_f, \quad (1)$$

где  $\Delta W_{mv}$  — энергия, затрачиваемая на отдельные частицы износа;

$\Delta W_{ph}$  — энергия, затрачиваемая на структурно-фазовые превращения;

$\Delta W_d$  — энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию;

$\Delta W_f$  — энергия, затрачиваемая на формоизменение трущихся поверхностей.

Поскольку в настоящее время не существует аналитических зависимостей, по которым можно с достаточной точностью оценить все составляющие зависимости (1), примем в первом приближении, что в результате фрикционного контактного взаимодействия будет происходить рассеяние внутренней энергии за счет:

— пластической деформации единичной микронеровности в результате сдвига на средний диаметр пятна контакта;

— формоизменения поверхностного слоя изнашиваемого материала в результате образования фрагмента износа;

— образования новых свободных поверхностей в результате отделения частицы износа.

Используя принципы неравновесной термодинамики, контактные процессы при нестационарном резании наиболее полно можно описать с помощью диссипативных функций (ДФ), представляющих собой скорость изменения  $dW_i/dt$  энергии, затрачиваемой на какой-либо процесс (например, пластическую деформацию обрабатываемого материала), отнесенной к единице фактической площади контакта  $A_r$  [5, 7, 8]:

$$\bar{\Psi}_i = \frac{dW_i}{d\tau A_r}. \quad (2)$$

Для обеспечения необратимости процесса необходимо наличие обобщенного термодинамического потока  $I_i$  и силы  $\Delta\sigma_i$  [4, 5], т.е. поддерживаемого градиента значений состояния термодинамической системы, препятствующих обратному процессу и взятых с обратным знаком. ДФ такого процесса равна произведению обобщенных потока и силы:

$$\bar{\Psi}_i = I_i(-\Delta\sigma_i). \quad (3)$$

С учетом вышеизложенных допущений, изменение внутренней энергии фрикционной





динамической системы  $\Delta W$  в результате действия внешних сил можно представить как сумму энергии, затраченной на диспергирование (износ) инструментального и упругопластическую деформацию обрабатываемого материала. В этом случае закон сохранения энергии запишем в виде баланса диссипативных функций:

$$\bar{\Psi}_b = \bar{\Psi}_f + \bar{\Psi}_d, \quad (4)$$

где  $\bar{\Psi}_b, \bar{\Psi}_f, \bar{\Psi}_d$  — ДФ внешних сил; процесса пластической деформации обрабатываемого материала в результате сдвига на средний диаметр пятна контакта; диспергирования и формоизменения поверхностного слоя изнашиваемого инструментального материала соответственно.

На основе анализа контактных процессов при нестационарном течении ДФ внешних сил представим как

$$\bar{\Psi}_b = P_z(\tau)v(\tau)/(l_1 + h_3)b, \quad (5)$$

где  $P_z(\tau), v(\tau)$  — текущие значения силы и скорости резания соответственно;

$l_1, h_3$  — длины контакта инструмента по передней и задней поверхностям соответственно;  $b$  — ширина срезаемого слоя.

Из анализа формоустойчивости режущего клина, модели накопления повреждаемости в приконтактных слоях инструмента при переменных элементах режима резания и вероятностного характера отделения частицы износа [1, 3]:

$$\bar{\Psi}_f = I_h v(\tau) \left( \frac{HV_n}{HV_\phi} \right)^\alpha \operatorname{erf} P \left[ P_r + \frac{12(1+\mu)}{E} \sigma_T^2 \right], \quad (6)$$

где  $I_h$  — интенсивность изнашивания режущего инструмента;

$\frac{HV_n}{HV_\phi}$  — отношение микротвердостей инструментального и обрабатываемого материалов;

$\alpha$  — показатель, учитывающий влияние температуры резания;

$\operatorname{erf} P$  — вероятность отделения частицы износа;

$P_r$  — нормальная удельная нагрузка в зоне контакта;

$\sigma_T = \frac{1}{2\sqrt{3}} HV_n$  — предел текучести инструментального материала.

ДФ пластической деформации обрабатываемого материала определена на основе дислокационной теории процесса с учетом понятия температуры модифицированной по скорости деформации и определяется текущим значением температуры резания  $\theta(\tau)$  и степенью пластической деформации  $\Delta\gamma$ , физико-механическими свойствами обрабатываемого материала [6, 8], а также виброхарактеристиками процесса резания  $f_r$ :

$$\bar{\Psi}_b = 10^4 \theta(\tau) \Delta\gamma \left[ f_r \frac{\sigma_{Т.д}}{G_d} \frac{\theta(\tau)}{\theta_{опт}} \exp \frac{\theta_{опт}}{\theta(\tau)} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (7)$$

Исходя из вышеизложенного и полученных зависимостей для составляющих баланса диссипативных функций (4–7) можно записать:

$$\frac{P_z(\tau)v f}{(l_1 + c)b} = 0,186\theta(\tau) I_d I_\theta + I_h v \left( \frac{HV_n}{HV_\phi} \right)^\alpha \times \operatorname{erf} P(\tau) \left[ P_r + \frac{12(1+\mu)}{E} \sigma_T^2 \right]. \quad (8)$$

Решая данное уравнение, получим выражение для расчета интенсивности изнашивания инструмента:

$$I_h = \frac{P_z(\tau)v f / (l_1 + c)b - 0,186\theta(\tau) I_d I_\theta}{v \left( \frac{HV_n}{HV_\phi} \right)^\alpha \operatorname{erf} P(\tau) \left[ P_r + \frac{12(1+\mu)}{E} \sigma_T^2 \right]}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что основными путями уменьшения интенсивности изнашивания лезвийных режущих инструментов являются:

— снижение коэффициента трения  $f$  на фрикционном контакте с обрабатываемым материалом (за счет образования на рабочих поверхностях вторичных структур и фаз — продуктов самоорганизации трибосистемы, а также применения СОТС и нестационарности резания, способствующих этому явлению);

— повышение значения отношения твердости контактирующих поверхностей инструмента  $HV_n$  и обрабатываемой детали  $HV_\phi$  (за счет уменьшения зависимости физико-механических свойств контактирующих поверхностей от температуры в рабочей зоне — с учетом явлений самоорганизации при трении);

— оптимального изменения температурно-силовых условий резания, используя изменение скорости резания по времени (ускорения) при вводе главного движения (ПГД).

## Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Для подтверждения математической модели интенсивности изнашивания режущего инструмента проведены серии экспериментальных исследований температурно-силовых параметров при переменности элементов режима резания. Сравнительный анализ зависимостей составляющих силы резания от скорости резания как при стационарном, так и при нестационарном течении показал, что они имеют различный уровень, т.е. составляющие сил резания при обработке с положительными ускорениями значительно ниже (рис. 1).

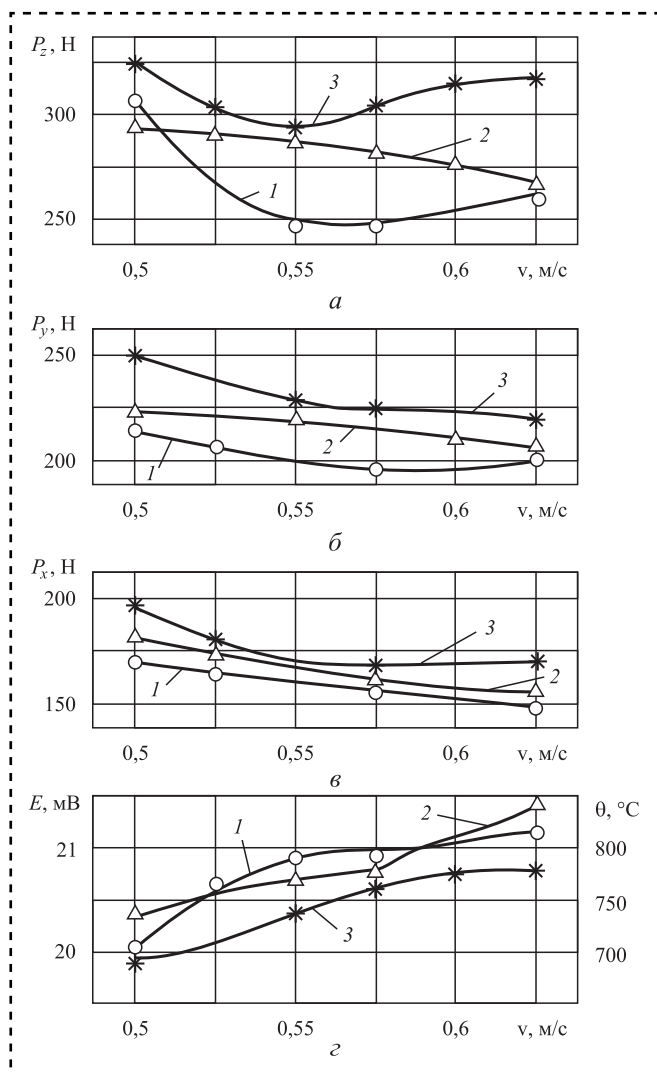


Рис. 1. Зависимость составляющих силы резания (а, б, в), термо-ЭДС и температуры (з) от скорости резания при тчении пар трения ХН73МБТЮ—ВК8 ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,5$  мм): 1 —  $a_v > 0$ ; 2 —  $a_v < 0$ ; 3 —  $a_v = 0$

По результатам экспериментальных исследований в программе Evrika получены математические модели для тангенциальной составляющей силы резания. Пакет прикладных программ Evrika позволяет методом наименьших квадратов провести аппроксимацию функций, статистических данных и широко применяется для инженерных расчетов.

При нестационарном течении (с переменными скоростями резания) для одной из исследуемых пар инструментального и обрабатываемого материалов (ХН73МБТЮ—ВК8) зависимость тангенциальной составляющей силы резания от скорости резания и ее ускорения имеет вид:

$$P_z(\tau) = 219,37 + 32,632\tau v_0^{-1,4(1 \pm a_v)} \quad (10)$$

при  $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,5$  мм.

При непрерывном изменении подачи в области практически применяемых конфигураций среза для чистового и получистового тчения ( $S = 0,05 \dots 0,15$  мм/об) составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  изменяются пропорционально 2:1, 5:1 (рис. 2).

Сила резания при нестационарном течении с изменением подачи по линейному закону изменяется нелинейно. При тчении с положительными скоростями изменения подачи ( $a_S > 0$ ) силы резания монотонно возрастают, но монотонно убывают при отрицательных скоростях изменения ( $a_S < 0$ ).

Аппроксимационная зависимость тангенциальной составляющей силы резания от подачи и скорости ее изменения  $a_S$  во времени  $\tau$ :

$$P_z(\tau) = 260,66 + 514,2\tau S^{1,3(1+a_S)} \quad (11)$$

при  $S = 0,5$  м/с;  $t = 0,5$  мм.

Таким образом, при нестационарном течении с изменением скорости резания и подачи по линейному закону сила резания существенно отличается по величине от силы резания, чем при стационарном течении ( $a_v = a_S = 0$ ) и является функцией от величины и знака скорости их изменения ( $a_v$ ,  $a_S$ ).

Для исследуемых сочетаний "резец—деталь" зависимости  $\theta(v)$  имеют немонотонный характер с точкой перегиба (инверсии) при работе на оптимальных скоростях резания, но со смещением точки в сторону высоких скоростей при тчении с положительными ускорениями ( $a_v > 0$ ) в сравнении с работой при  $a_v = 0$  и в сто-

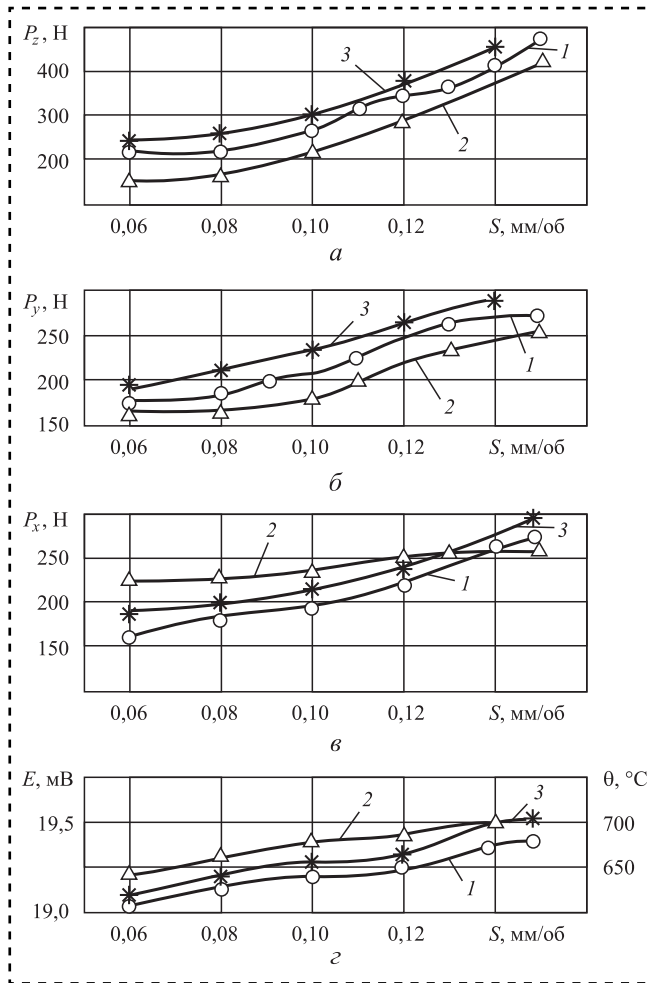


Рис. 2. Зависимость составляющих силы резания (*a*, *б*, *в*), термо-ЭДС и температур (*г*) от подачи при точении пар трения ХН73МБТЮ–ВК8 ( $v = 0,66$  м/с;  $t = 0,5$  мм):  
1 –  $a_s > 0$ ; 2 –  $a_s < 0$ ; 3 –  $a_s < 0$

рону меньших скоростей при работе с отрицательными ускорениями ( $a_v > 0$ ).

Анализ зависимостей температуры от скорости и подачи при нестационарном течении подтверждает, что основное влияние на температуру резания оказывает скорость резания и обрабатываемый материал при прочих равных условиях. Инструментальные материалы при нестационарном течении, как и при стационарном течении обрабатываемых материалов оказывают неоднозначное влияние на температуру резания, что связано со сложным характером их влияния, в первую очередь, на процессы фрикционного взаимодействия, во многом определяющие температуру в зоне резания.

По результатам экспериментальных исследований получены аппроксимационные зависимости для температуры резания при непре-

рывном изменении скорости резания  $v$  с ускорением  $a_v$  во времени  $\tau$ :

$$\theta(\tau) = 295,6 + v_0^{0,8(1 \pm a_v)} \tau \quad (12)$$

и при непрерывном изменении подачи:

$$\theta(\tau) = 512,4 + 33,2 S_0^{0,8(1 \pm a_s)} \tau. \quad (13)$$

Для конкретизации зависимости составляющих баланса диссипативных функций  $\Psi_f$ ,  $\Psi_d$ ,  $\Psi_f$  и обеспечения условий минимизации интенсивности изнашивания инструмента  $I_h$  при нестационарном течении получены зависимости основных выходных параметров (тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , относительного линейного износа инструмента  $h_{ол}$ , скорости резания  $v$ , в виде удельной энергии, затраченной на процессы трения и изнашивания режущего инструмента, от температуры резания при нестационарном течении (см. рис. 1).

Удельная энергия,  $\frac{H \cdot M}{с \cdot M^2}$ , затрачиваемая на процессы трения и изнашивания [8]:

$$\Delta W = \frac{P_z v}{F_k}, \quad (14)$$

где  $F_k$  — площадь контактных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом и стружкой.

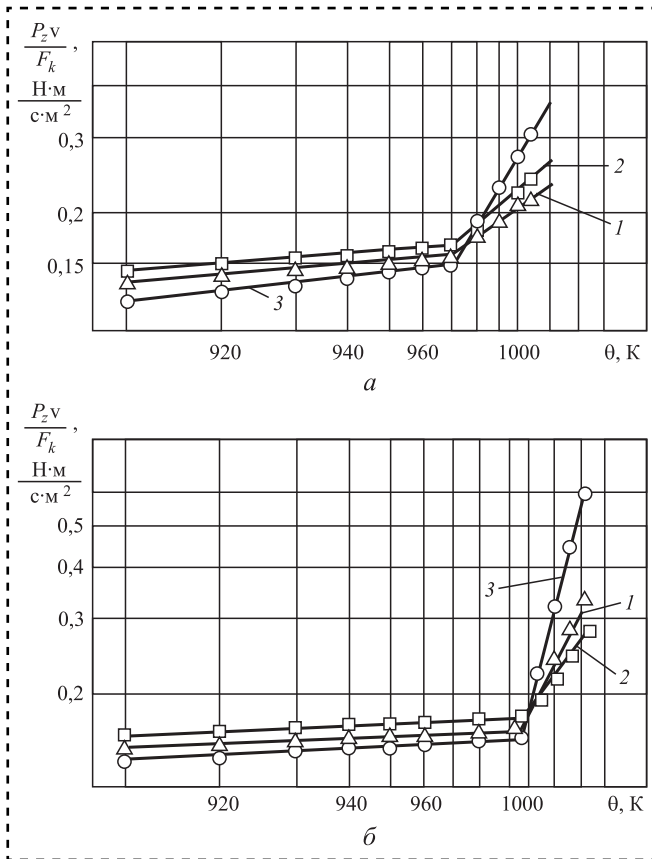
Зависимости температуры резания и удельной энергии, затрачиваемой на процессы трения и изнашивания для всех исследуемых пар при нестационарном течении, показали (рис. 3):

— график зависимости имеет характерный перелом при температурах, соответствующих оптимальной температуре стационарного течения;

— при температурах  $\theta > \theta_{опт}$  зависимость имеет различный угол наклона для различных ускорений ПГД;

— удельная энергия для различных ускорений ПГД как по знаку, так и по величине имеет разный уровень и минимум при ускорении ( $a_v > 0$ ), соответствующий меньшей температурно-силовой напряженности зоны резания.

Эксперименты, проведенные с непрерывно изменяющейся скоростью резания с различными ускорениями ПГД как по знаку, так и по величине ( $a_v \neq 0$ ) показали, что для всех

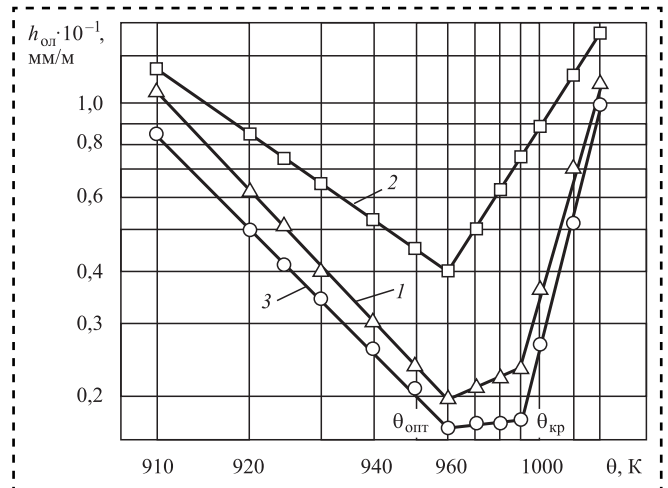


**Рис. 3.** Зависимость удельной энергии, затрачиваемой на процессы трения, от температуры резания при нестационарном и дискретном точении пар трения 15X18H12C4TЮ–BK8 (а) и ХН73МБТЮ–BK8 (б) ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,5$  мм):  
1 –  $a_v > 0$ ; 2 –  $a_v < 0$ ; 3 –  $a_v = 0$

исследуемых пар преобладает износ по задней главной и вспомогательной поверхностям инструмента. При чистовой и получистовой обработке ( $S = 0,05...1,5$  мм/об;  $t = 0,25...0,5$  мм) лунка на передней поверхности располагается ближе к главной режущей кромке. По мере изнашивания инструмента лунки соединяются с фасками износа, что предопределяет наступление катастрофического износа.

Зависимость износа от скорости резания носит экстремальный характер. При работе с положительным ускорением ( $a_v > 0$ ) эта зависимость более пологая по сравнению с  $a_v < 0$  или же  $a_v = 0$  (рис. 4).

С изменением температуры интенсивность изнашивания изменяется немонотонно [1–5]. Обычно в процессе стойкостного эксперимента температура в зоне резания изменяется непрерывно в результате увеличения фаски износа по задней поверхности резца. Изменение фаски износа ведет к перераспределению тепловых



**Рис. 4.** Зависимость относительного линейного износа от температуры при точении пар трения 15X18H12C4TЮ–BK8 с различными ускорениями ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,5$  мм):  
1 –  $a_v < 0$ ; 2 –  $a_v = 0$ ; 3 –  $a_v > 0$

потоков на режущих гранях инструмента, что в свою очередь, изменяет интенсивность изнашивания. Зависимость логарифма интенсивности изнашивания инструмента от температуры при стационарном и нестационарном точении носит экстремальный характер с минимумом при температуре, соответствующей оптимальной для стационарного точения (см. рис. 4).

Эта зависимость при нестационарном точении имеет три участка:

I участок — до оптимальной температуры  $\theta_{\text{опт}}$ ;

II участок — от оптимальной до критической температуры  $\theta_{\text{кр}}$ ;

III участок — выше критической температуры.

Появление критической температуры вызывают с изменением динамических коэффициентов запаса контактной или поверхностной прочности инструментального и обрабатываемого материалов [2, 3].

## Заключение

Зависимость интенсивности изнашивания инструмента от скорости резания как при стационарном, так и нестационарном точении носит экстремальный характер. При нестационарном точении минимум интенсивности изнашивания инструмента наблюдается при более высоких скоростях резания.

Интенсивность изнашивания инструмента при нестационарном точении ( $a_v, a_s$ ) значи-



тельно меньше, чем при стационарном, что, по-видимому, связано с уменьшением температурно-силовой напряженности зоны резания.

Минимум зависимости интенсивности изнашивания от температуры резания при нестационарном точении наблюдается при температуре, оптимальной для стационарного точения. Это подтверждает положение об оптимальной температуре А.Д. Макарова применительно и к нестационарному точению [3].

Наличие площадки на зависимости интенсивности изнашивания инструмента от температуры резания, т.е. температурного диапазона  $\theta_{кр} \dots \theta_{опт}$ , определяет область рационального использования определенной марки твердого сплава при обработке резанием данного обрабатываемого материала с минимумом интенсивности изнашивания инструмента и может служить одним из критериев обрабатываемости этого материала, а также для определения граничных условий на режимы резания при нестационарном точении.

#### Библиографический список

1. **Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С.** Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.

2. **Лоладзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

3. **Макаров А.Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

4. **Костецкий Б.И., Носовский М.Г., Бершадский Л.И.** Поверхностная прочность материалов при трении. Киев: Техника, 1976. 26 с.

5. **Гершман И.С., Буше Н.А.** Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1. С. 61–70.

6. **Иванова В.С., Буше Н.А., Гершман И.С.** Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 1. С. 74–79.

7. **Пригожин И.** Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: Иностранная литература, 1960. 127 с.

8. **Мигранов М.Ш.** Термодинамическая модель изнашивания режущего инструмента в условиях нестационарности // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 5. С. 23–26.

9. **Мигранов М.Ш.** Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. Уфа: Гилем, 2011. 212 с.

10. **Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш.** Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1977. 552 с.

11. **Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кузьмишина А.М.** Интеллектуальное управление технологическими системами в условиях цифрового производства // Известия вузов. Машиностроение. 2020. № 1. С. 24–32.



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

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

## Управляющие воздействия для приведения в заданное состояние широкого класса автоколебаний

*В системе управления колебаниями рассмотрено решение задачи определения необходимых управляющих воздействий для перевода колебаний из одного состояния в другое для широкого класса колебаний: гармонических свободных и затухающих, вынужденных колебаний, подчиняющихся уравнению Эйлера. Структура и параметры управляющих воздействий определены на основе методов теории оптимального управления.*

*In the most important oscillation control system, the solution of the problem of determining the necessary control actions for transferring vibrations from one state to another is considered for a wide class of oscillations: harmonic, damped, and forced oscillations obeying the Euler equation. The structure and parameters of control actions are determined based on the methods of optimal control theory.*

**Ключевые слова:** управляющие воздействия, гармонические колебания, затухающие колебания, вынужденные колебания, уравнение Эйлера, метод оптимального управления множителей Лагранжа.

**Keywords:** control impacts, harmonic oscillations, damped oscillations, forced oscillations, Euler equation, optimal control method for Lagrange multipliers.

В системе управления процессами управления колебаниями важнейшей задачей является определение необходимых управляющих воздействий для перевода их из одного состояния в другое [1–3]. Эти процессы могут быть физико-техническими, экономическими, финансовыми и др. Рассмотрим метод приведения в заданное состояние трех видов автоколебаний за заданное время. Возможны варианты с применением разработанного закона управляющего воздействия несколько раз подряд или с чередованием воздействия и его отключения. Закон управляющего воздействия разработан с помощью одного из методов оптимального управления метода множителей Лагранжа.

Рассматриваемые три вида колебаний описываются следующими дифференциальными уравнениями:

— гармонические свободные колебания

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0; \quad (1)$$

— гармонические затухающие колебания

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0; \quad (2)$$

— вынужденное уравнение Эйлера

$$t^2 \ddot{x} + (2\gamma + 2a + 1)t\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  — собственная частота колебаний;  
 $\gamma$  — коэффициент затухания силы трения,  
 $\gamma = 0$  для свободных колебаний;  
 $a$  — коэффициент уравнения Эйлера.

Уравнение Эйлера (3) при замене  $t \rightarrow \exp(t)$  преобразуется в эквивалентное линейное однородное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами [3]:

$$\ddot{x} + 2(\gamma + a)\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (4)$$

которое объединяет уравнения (1)–(3) в единое уравнение при следующих значениях постоянных коэффициентов:

$\gamma = 0, a = 0$  — свободные колебания;  
 $\gamma > 0, a = 0$  — затухающие колебания;  
 $\gamma \geq 0, a > 0$  — уравнение Эйлера.

Введем в правую часть системы (4) управляющее воздействие  $u(t)$ , зависящее только от времени  $t$  (не зависит от  $x, \dot{x}$ ):

$$\ddot{x} + 2(\gamma + a)\dot{x} + \omega_0^2 x = u(t). \quad (5)$$



Структуру и параметры управляющего воздействия  $u(t)$  необходимо определить при следующих условиях:

- начальное состояние системы:  $x(0) = x_0$ ,  $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$ ;
- состояние в момент времени  $T$ :  $x(T) = x_k$ ,  $\dot{x}(T) = \dot{x}_k$ .

Последнее условие для краткости обозначим  $(x_k, \dot{x}_k)$ .

Замена  $x = X \exp[-(\gamma + a)t]$  приводит уравнение (2) к эквивалентному виду [3]:

$$\ddot{X} + \omega^2 X = U(t); \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - (\gamma + a)^2}; \quad (6)$$

$$\omega_0 > \gamma + a; \quad U(t) = u(t) \exp((\gamma + a)t).$$

Для перевода колебаний, описываемых уравнением (5), в состояние  $(x_k, \dot{x}_k)$  за любое заданное время  $T$ , определено необходимое управляющее воздействие [1].

Для всех видов колебаний, описываемых уравнением (5), перевод в состояние  $(x_k, \dot{x}_k)$  обеспечивает один и тот же закон управляющего воздействия:

$$U(t) = \begin{cases} \lambda_1 \sin \omega(T-t) + \lambda_2 \cos \omega(T-t), & t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (7)$$

Множители Лагранжа  $\lambda_1, \lambda_2$  определяются как решение системы следующих двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \left[ \int_0^T \sin^2 \omega(T-t) dt \right] \lambda_1 + \\ & + \left[ \int_0^T \sin \omega(T-t) \cos \omega(T-t) dt \right] \lambda_2 = \quad (8) \\ & = -\omega x_0 \cos \omega T - \dot{x}_0 \sin \omega T + \omega x_k; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[ \int_0^T \sin \omega(T-t) \cos \omega(T-t) dt \right] \lambda_1 + \\ & + \left[ \int_0^T \cos^2 \omega(T-t) dt \right] \lambda_2 = \quad (9) \\ & = \omega x_0 \sin \omega T - \dot{x}_0 \cos \omega T + \dot{x}_k, \end{aligned}$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - (\gamma + a)^2}$ ;  $\omega_0 > \gamma + a$ .

Интегральную интенсивность воздействия  $V(U)$  рассчитываем по формуле:

$$V(U(t)) = \int_0^T U(t)^2 dt. \quad (10)$$

Полученные формулы закона управляющего воздействия и интегральной интенсивности зависят только от времени и явно не зависят от координаты  $x(t)$  и скорости  $\dot{x}(t)$ .

Вычислительный алгоритм решения задачи состоит из следующих этапов:

1. Задание начальных и конечных условий  $x_0, \dot{x}_0, x_k, \dot{x}_k$ , а также параметров  $T, \omega_0, \gamma, a$ .
2. Расчет множителей Лагранжа  $\lambda_1, \lambda_2$  как решение системы двух линейных алгебраических уравнений (8), (9).
3. Решение дифференциального уравнения (6) на участке с законом управляющего воздействия  $U(t)$  (7) и интегральной интенсивностью воздействия  $V(U)$  (10).

4. Решение дифференциального уравнения (5) при условии  $U(t) = 0$ .

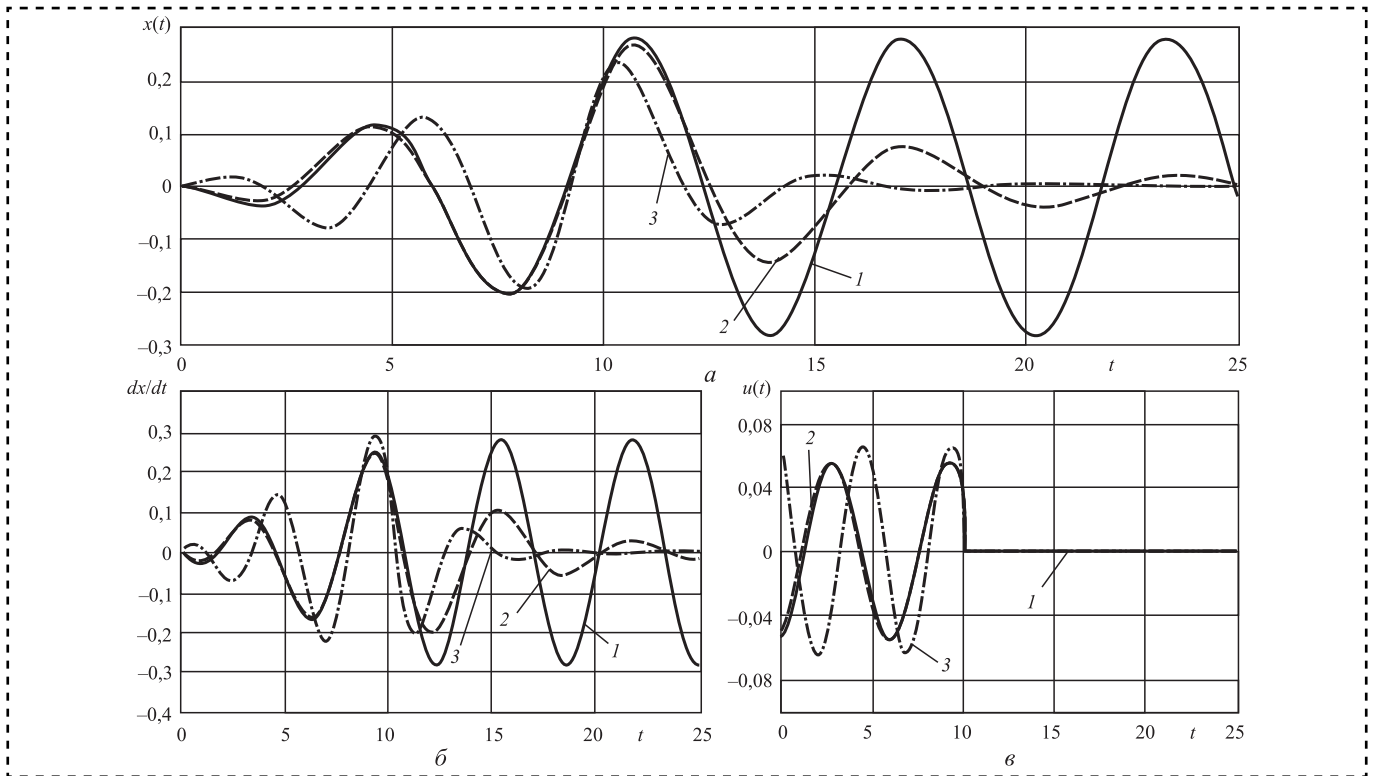
Возможно применение закона управляющего воздействия на нескольких участках, причем на некоторых из них при необходимости отключается управляющее воздействие. Начальные условия очередного участка принимаются равными конечным условиям предыдущего участка независимо от требования наличия или отсутствия управляющего воздействия. Необходимо обратить внимание на случай, когда на соседних участках наблюдается расхождение граничных условий.

### Результаты расчетов применения управляющих воздействий для приведения в заданное состояние рассмотренных видов автоколебаний

На рис. 1 представлена зависимость от времени амплитуды колебаний  $x(t)$  для перевода в заданное состояние исследуемых видов автоколебаний: гармонических свободных (кривые 1), затухающих (кривые 2) и вынужденных колебаний, подчиняющихся уравнению Эйлера (кривые 3).

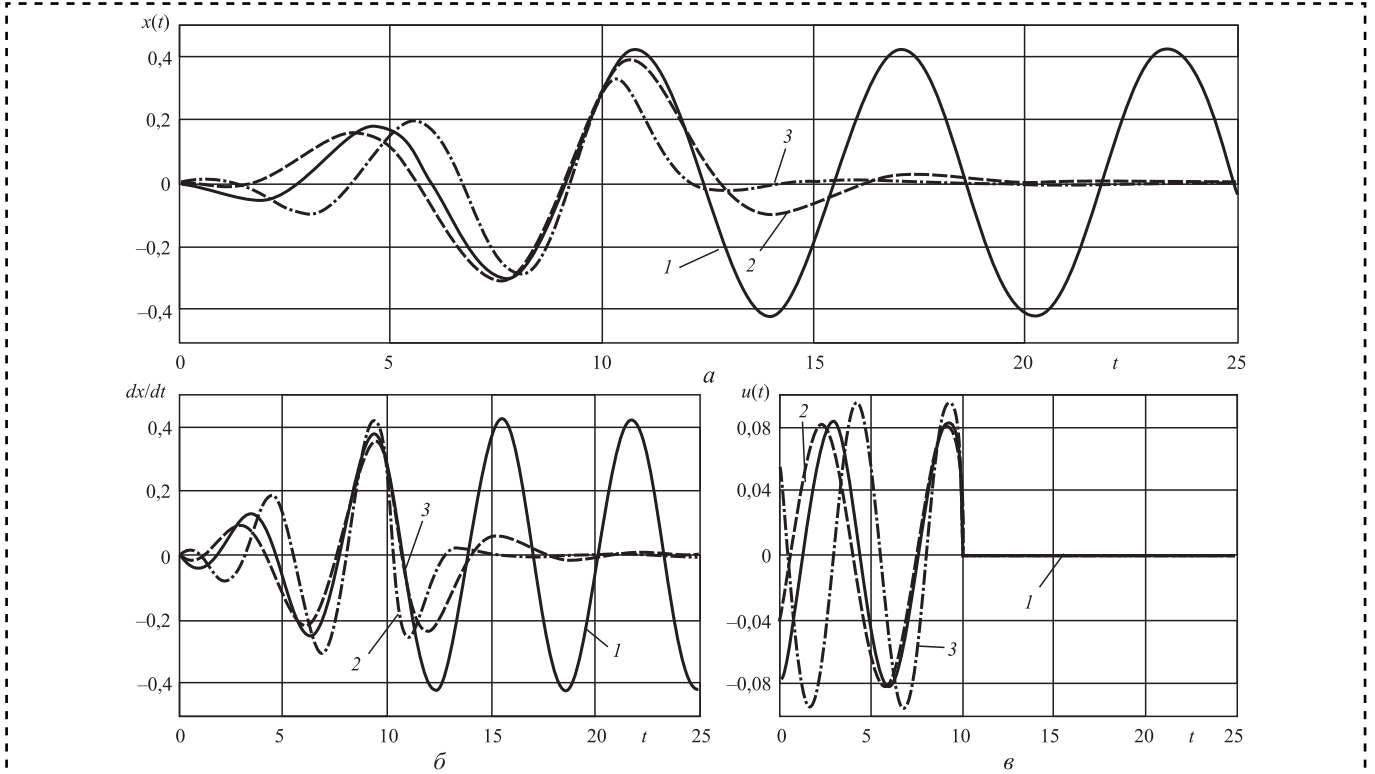
Наблюдается точное попадание в момент времени  $T$  в заданную точку и с этой точки в зависимости от типа колебания начинается дальнейшее движение. Максимальная амплитуда колебаний после отключения управляющего воздействия некоторое время продолжает расти с максимальных значений 0,2 до примерно 0,28. Потребная интенсивность управляющего воздействия характеризуется для каждого типа колебаний показателем  $V$ .

Рисунки 2, 3 позволяют провести сравнительный анализ влияния типа колебаний и их



**Рис 1.** Зависимости  $x(t)$ ,  $dx/dt$ ,  $u(t)$  перевода колебаний из состояния покоя ( $x_0 = 0$ ,  $\dot{x}_0 = 0$ ) в точку ( $x_k = 0,2$ ,  $\dot{x}_k = 0,2$ ) и последующего колебания с отключенным управляющим воздействием ( $T = 10$ ,  $T_k = 25$ ):

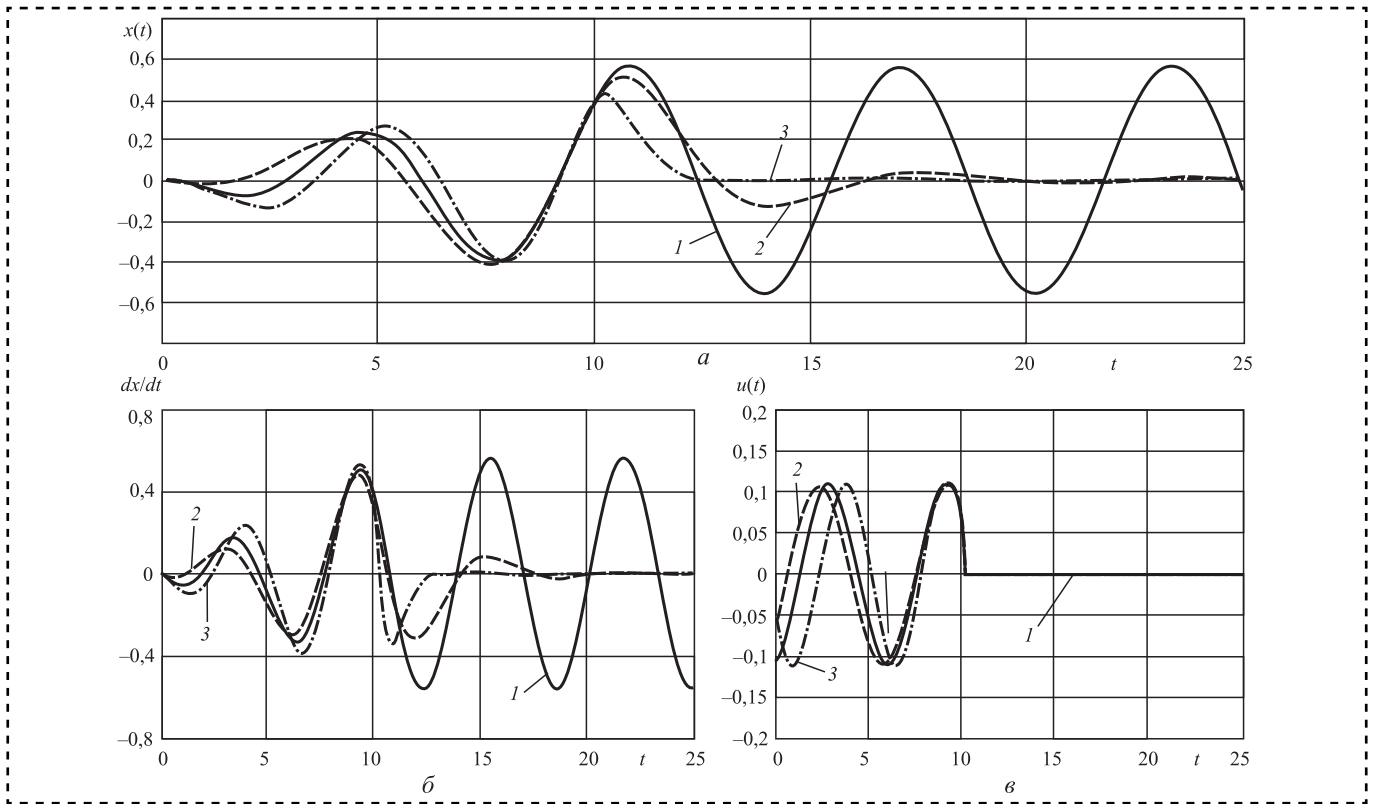
1 — свободные;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma = 0$ ;  $a = 0$ ;  $\lambda_1 = 0,0408$ ;  $\lambda_2 = 0,0371$ ;  $V = 0,0156$ ; 2 — затухающие;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma = 0,2$ ;  $a = 0$ ;  $\lambda_1 = 0,0401$ ;  $\lambda_2 = 0,0381$ ;  $V = 0,0155$ ; 3 — уравнение Эйлера;  $\omega_0 = 1,4$ ;  $\gamma = 0$ ;  $a = 0,5$ ;  $\lambda_1 = 0,0534$ ;  $\lambda_2 = 0,0378$ ;  $V = 0,0215$



**Рис 2.** Зависимости  $x(t)$ ,  $dx/dt$ ,  $u(t)$  перевода колебаний из состояния покоя ( $x_0 = 0$ ,  $\dot{x}_0 = 0$ ) в точку ( $x_k = 0,3$ ,  $\dot{x}_k = 0,3$ ) с измененными для сравнения параметрами  $\gamma = 0,4$  (затухающие колебания) и  $\omega_0 = 1,6$ ,  $a = 1$  (уравнение Эйлера) ( $T = 10$ ,  $T_k = 25$ ):

1 — свободные;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma = 0$ ;  $a = 0$ ;  $\lambda_1 = 0,0611$ ;  $\lambda_2 = 0,0557$ ;  $V = 0,035$ ; 2 — затухающие;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma = 0,4$ ;  $a = 0$ ;  $\lambda_1 = 0,0531$ ;  $\lambda_2 = 0,0613$ ;  $V = 0,033$ ; 3 — уравнение Эйлера;  $\omega_0 = 1,6$ ;  $\gamma = 0$ ;  $a = 1$ ;  $\lambda_1 = 0,0745$ ;  $\lambda_2 = 0,0603$ ;  $V = 0,046$





**Рис 3. Зависимости  $x(t)$ ,  $dx/dt$ ,  $u(t)$  перевода колебаний из состояния покоя ( $x_0 = 0$ ,  $\dot{x}_0 = 0$ ) в точку ( $x_k = 0,4$ ,  $\dot{x}_k = 0,4$ ) с параметрами  $\gamma = 0,4$  (затухающие колебания) и  $\omega_0 = 1,8$ ,  $\gamma = 0,4$ ,  $a = 1$  (уравнение Эйлера) ( $T = 10$ ,  $T_k = 25$ ):**

*1* — свободные;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma = 0$ ;  $a = 0$ ;  $\lambda_1 = 0,0815$ ;  $\lambda_2 = 0,0742$ ;  $V = 0,0623$ ; *2* — затухающие;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma = 0,4$ ;  $a = 0$ ;  $\lambda_1 = 0,0708$ ;  $\lambda_2 = 0,0817$ ;  $V = 0,0586$ ; *3* — уравнение Эйлера;  $\omega_0 = 1,8$ ;  $\gamma = 0,4$ ;  $a = 1$ ;  $\lambda_1 = 0,0823$ ;  $\lambda_2 = 0,0754$ ;  $V = 0,0674$

параметров на приведение в заданное состояние рассмотренных видов автоколебаний за заданное время  $T$ .

Наблюдается также точное попадание в момент времени  $T$  в заданную точку. По-прежнему некоторое время продолжается рост максимальной амплитуды колебаний с максимальных значений 0,3...0,4 до 0,42...0,58. Потребная интенсивность управляющего воздействия для перевода на более высокие амплитуды увеличилась в 2—4 раза.

На рис. 4—6 показано влияние собственной частоты колебаний  $\omega_0$  при решении задачи перевода исследуемых колебаний: свободных, затухающих и подчиняющихся уравнению Эйлера из одного состояния в другое.

Процедура перевода состоит из трех участков по времени:

— участок *1* от точки покоя ( $x_0 = 0$ ;  $\dot{x}_0 = 0$ ) до точки ( $x_k = 0,2$ ;  $\dot{x}_k = 0,2$ ) за время  $T = T_1 = 10$  с включением управляющего воздействия;

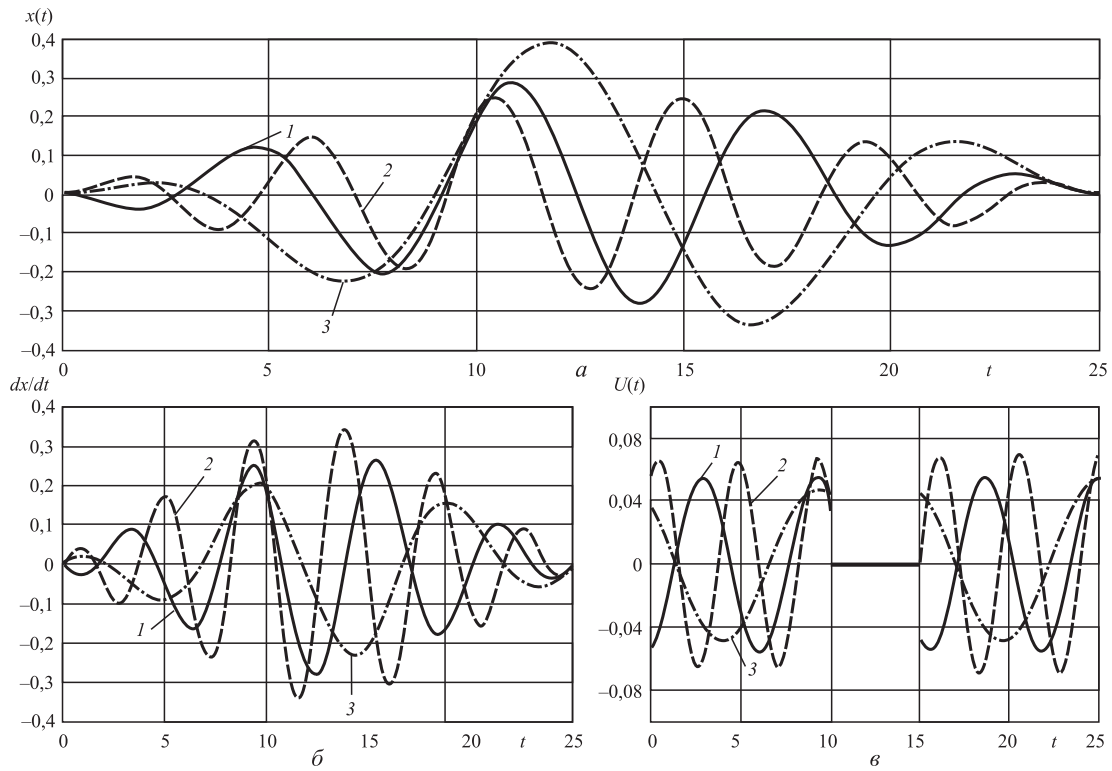
— участок *2* от точки ( $x_0 = 0,2$ ;  $\dot{x}_0 = 0,2$ ) с отключением управляющего воздействия за время  $T = T_2 - T_1 = 5$ . Конечная точка ( $x_{x0}$ ,  $x_{x1}$ ) фик-

сируется и используется в качестве начальной на участке *3*;

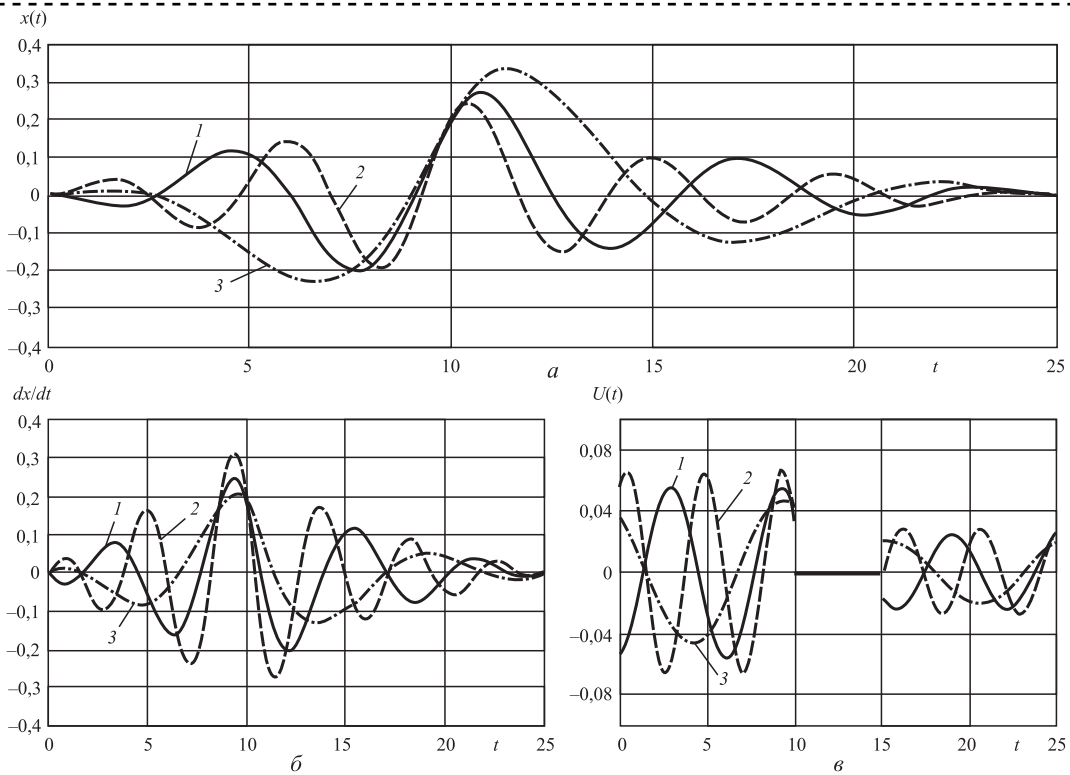
— участок *3* от точки ( $x_0 = x_{x0}$ ;  $\dot{x}_0 = x_{x1}$ ) до точки покоя ( $x_k = 0$ ;  $\dot{x}_k = 0$ ) за время  $T = T_3 - T_2 = 10$  с включением управляющего воздействия.

Для всех варьируемых частот с включением управляющего воздействия на участках *1*, *3* наблюдается точный перевод в заданную конечную точку. При этом максимальная фактическая амплитуда с частотой  $\omega_0 = 0,6$  на участке *2* достигает 0,4. С ростом варьируемой частоты до  $\omega_0 = 1,4$  максимальная фактическая амплитуда падает до 0,25. Наибольшая интегральная интенсивность  $V(U(t))$  наблюдается для собственной частоты колебаний  $\omega_0 = 1,4$  и в 1,5—2,0 раза больше, чем для частот  $\omega_0 = 1,0$ ; 0,6 соответственно. Такой результат связан с зависимостью только от времени интегральной интенсивности  $V(U(t))$  и явной независимости от координаты  $x(t)$  и скорости  $\dot{x}(t)$ .

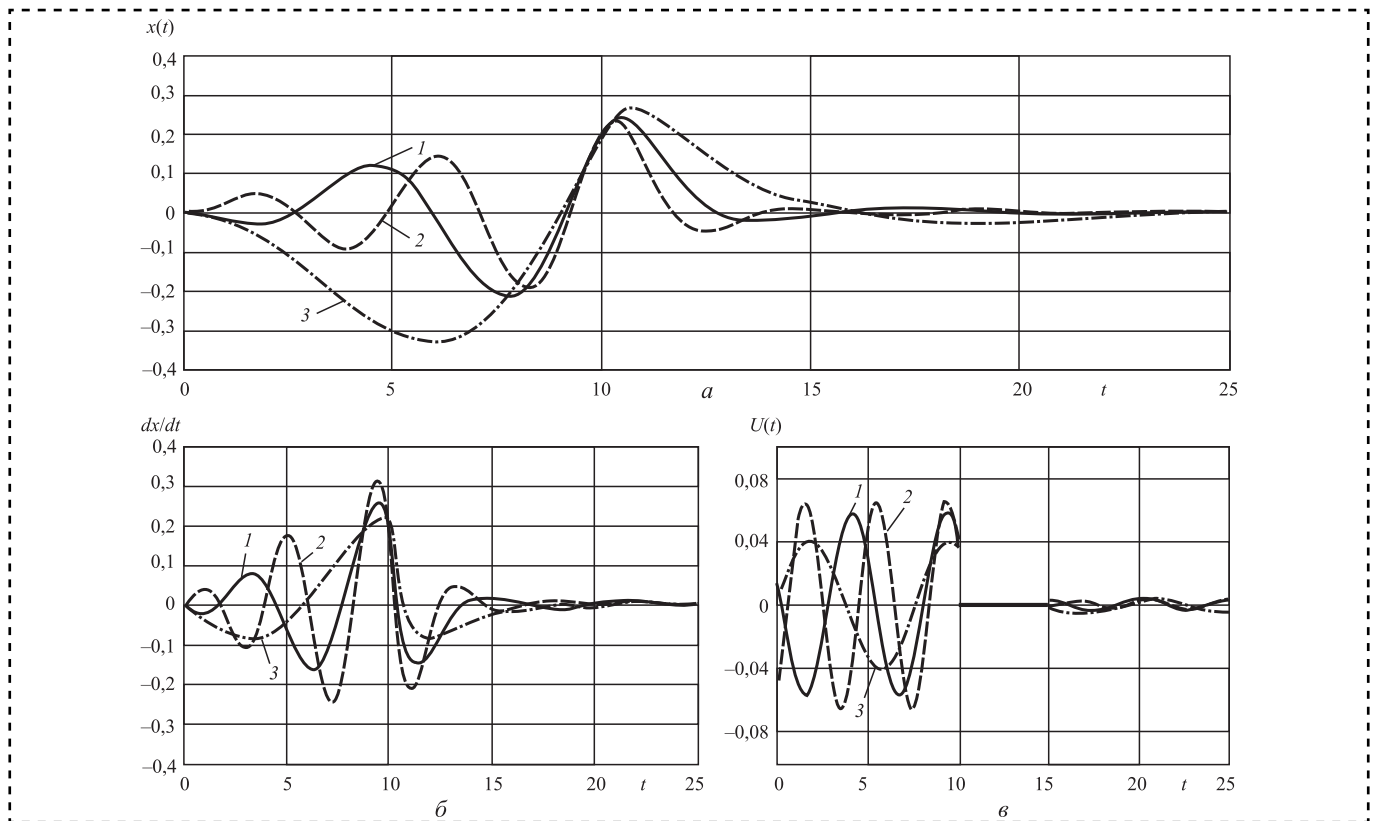
При переходе на рис. 5 к затухающим колебаниям максимальная фактическая амплитуда с частотой  $\omega_0 = 0,6$  уменьшается до 0,35. Повышение варьируемой частоты  $\omega_0$  приводит



**Рис. 4.** Зависимости  $x(t)$ ,  $dx/dt$ ,  $U(t)$  для различных частот колебаний  $\omega_0$  при переводе гармонических свободных колебаний из состояния покоя в точку ( $x_k = 0,2$ ,  $\dot{x}_k = 0,2$ ) и возвращение в состояние покоя ( $T_1 = 10$ ;  $T_2 = 15$ ;  $T_3 = 25$ ;  $\gamma = 0$ ;  $a = 0$ ): 1 – участок 1;  $\omega_0 = 1$ ;  $x_{x0} = -0,135$ ;  $x_{x1} = 0,249$ ;  $V = 0,0311$ ; 2 – участок 2;  $\omega_0 = 1,4$ ;  $x_{x0} = 0,245$ ;  $x_{x1} = -0,033$ ;  $V = 0,0463$ ; 3 – участок 3;  $\omega_0 = 0,6$ ;  $x_{x0} = -0,151$ ;  $x_{x1} = -0,215$ ;  $V = 0,0225$



**Рис. 5.** Зависимости  $x(t)$ ,  $dx/dt$ ,  $U(t)$  для различных частот колебаний  $\omega_0$  при переводе гармонических затухающих колебаний из состояния покоя в точку ( $x_k = 0,2$ ,  $\dot{x}_k = 0,2$ ) и возвращение в состояние покоя ( $T_1 = 10$ ;  $T_2 = 15$ ;  $T_3 = 25$ ;  $\gamma = 0,2$ ;  $a = 0$ ): 1 – участок 1;  $\omega_0 = 1$ ;  $x_{x0} = -0,075$ ;  $x_{x1} = 0,102$ ;  $V = 0,0189$ ; 2 – участок 2;  $\omega_0 = 1,4$ ;  $x_{x0} = 0,097$ ;  $x_{x1} = -0,01$ ;  $V = 0,0261$ ; 3 – участок 3;  $\omega_0 = 0,6$ ;  $x_{x0} = -0,022$ ;  $x_{x1} = -0,092$ ;  $V = 0,0126$



**Рис. 6.** Зависимости  $x(t)$ ,  $dx/dt$ ,  $U(t)$  для различных частот колебаний  $\omega_0$  при переводе вынужденных колебаний, подчиняющихся уравнению Эйлера, из состояния покоя в точку ( $x_k = 0,2$ ,  $\dot{x}_k = 0,2$ ) и возвращение в состояние покоя ( $T_1 = 10$ ;  $T_2 = 15$ ;  $T_3 = 25$ ;  $\gamma = 0,2$ ;  $a = 0,5$ ):

1 – участок 1;  $\omega_0 = 1,2$ ;  $x_{x0} = -0,009$ ;  $x_{x1} = 0,014$ ;  $V = 0,0169$ ; 2 – участок 2;  $\omega_0 = 1,6$ ;  $x_{x0} = 0,009$ ;  $x_{x1} = -0,007$ ;  $V = 0,0213$ ; 3 – участок 3;  $\omega_0 = 0,8$ ;  $x_{x0} = 0,023$ ;  $x_{x1} = -0,022$ ;  $V = 0,0087$

к снижению максимальной амплитуды до 0,25. Для затухающих колебаний по-прежнему наибольшая интегральная интенсивность  $V(U(t))$  наблюдается для собственной частоты колебаний  $\omega_0 = 1,4$  и в 1,5–2,0 раза больше, чем для частот  $\omega_0 = 1,0$ ; 0,6.

Для колебаний, подчиняющихся уравнению Эйлера второго порядка, максимальная фактическая амплитуда с частотой  $\omega_0 = 0,8$  равна 0,25. Повышение варьируемой частоты  $\omega_0$  приводит к незначительному снижению максимальной амплитуды.

При этом наибольшая интегральная интенсивность  $V(U(t))$  наблюдается для собственной частоты колебаний  $\omega_0 = 1,6$  и в 1,3–2,4 раза больше, чем для частот  $\omega_0 = 1,2$ ; 0,8.

## Выводы

1. Исследована возможность приведения в заданное состояние широкого класса автоколебаний путем использования оптимального

закона управляющего воздействия, зависящего только от времени. Структура управляющего воздействия определена на основе теории оптимального управления.

2. Рассмотрены варианты однократного и многократного применения оптимального закона управляющего воздействия с различными типами и параметрами колебаний.

3. Приведенные расчеты подтверждают эффективность метода проведенного исследования.

## Библиографический список

1. Эрлих Б.М. Методика изменения состояния гармонических колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. Т. 19. С. 39–43.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением. Линейные системы. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 1968. 476 с.
3. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физматлит, 2001. 576 с.

**Ю.З. Житников**, д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярёва),

**Б.Ю. Житников**, д-р техн. наук

(Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (РАНХиГС) Владимирский филиал)

E-mail: zhitnikov@mail.ru

## Устройство автоматизированной установки кольцевых резиновых уплотнений в наружные канавки цилиндрических деталей

*Обоснована сила растяжения кольцевого резинового уплотнения при автоматизированной установке в нарезанные канавки цилиндрических деталей без взаимодействия с их поверхностями.*

*The tensile force of an annular rubber seal is substantiated during automated installation into the cut grooves of cylindrical parts without interaction with their surfaces.*

**Ключевые слова:** кольцевые резиновые уплотнения, наружные канавки цилиндрических деталей, силы растяжения, автоматизированная установка.

**Keywords:** rubber O-rings, outer grooves of cylindrical parts, tensile forces, automated installation.

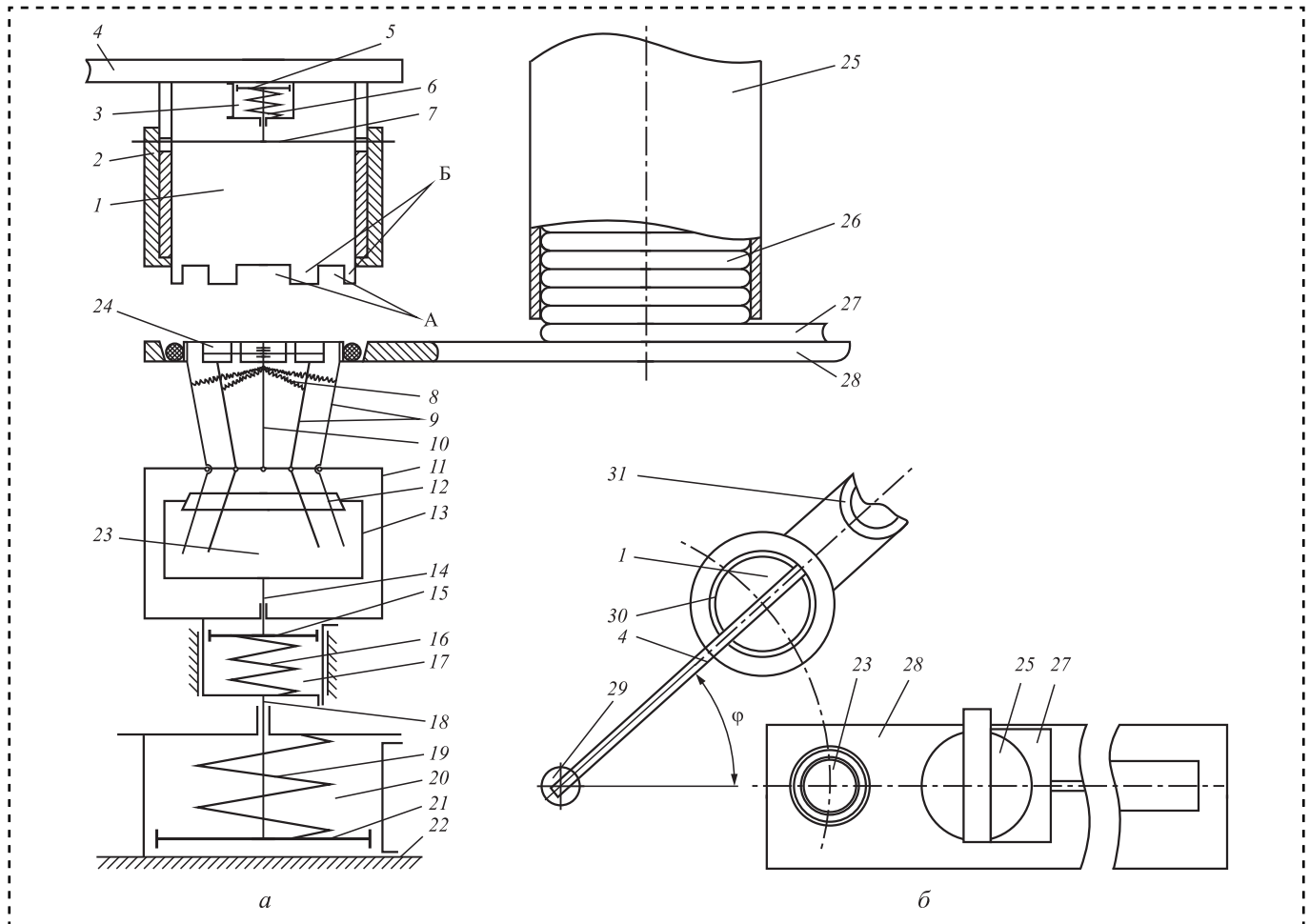
В настоящее время установку кольцевых резиновых уплотнений цилиндрического и прямоугольного сечения в наружные канавки цилиндрических деталей осуществляют путем перемещения (скольжения) уплотнения по поверхности детали, что может привести к его перекручиванию вокруг оси сечения. Перекрученное уплотнение при кратковременной эксплуатации изделия разрывается, нарушается герметичность, изделие выходит из строя. Для исключения этого явления предложено автоматизированное устройство (рис. 1) [1, 2].

Устройство установки кольцевых резиновых уплотнений в наружные канавки цилиндрических деталей состоит из основания 22, над плитой 28 которого закреплен магазин 25 уплотнений 26, а оправка 1 для установки растянутых (деформированных) кольцевых уплотнений 26 расположена на поворотном кронштейне 4. На плите 28 закреплен пневмопривод (условно не показан), шток которого шарнирно связан с шибером 27, торец которого выполнен в форме полукруга для надежного перемещения и точной установки кольцевого уплотнения в зоне растяжения.

Снизу плиты 28 на основании 22 закреплен пневмоцилиндр 20. Шток 18 поршня 21, поджатого пружиной 19, связан с корпусом подвижного пневмоцилиндра 17, предназначенного для воздействия через кольцо 12 на рычаги 9, поджатые пружинами 8 к корпусу 10, обеспечивающие растяжение резинового уплотнения. Рычаги 9 шарнирно закреплены к раме 11.

Оправка 1 снабжена пневмоцилиндром 3, поршень которого поджат пружиной 6. Шток поршня жестко связан с осью 7, которая перемещается по пазу цилиндра основания оправки 1. Ось 7 проходит через отверстие цилиндрического сбрасывателя уплотнений 2.

Устройство работает следующим образом. В исходном положении шибер 27 для приема кольцевого уплотнения 26 расположен под магазином, а уплотнение, выпавшее из магазина 25, расположено перед полукруглым торцом шибера 27. Оправка 1, прикрепленная к поворотному кронштейну 29, находится над отверстием плиты 28, куда шибером подается уплотнение для установки в наружную канавку цилиндрической детали.



**Рис. 1. Устройство для установки упругих колец в наружные канавки цилиндрических деталей:**  
*а* — общий вид; *б* — вид сверху

Подается сжатый воздух в полость пневмопривода для перемещения шибера (условно не показан) с уплотнением на позицию его растяжения. Уплотнение устанавливается на фаску отверстия с четырьмя радиальными пазами на плите 28 для перемещения губок 24 при растяжении уплотнения. Приводом шибера возвращается в исходное положение.

Подается сжатый воздух в нижнюю полость пневмоцилиндра 20. Поршень 21, сжимая пружину 19, перемещается вверх. А его шток 18 перемещает подвижный пневмоцилиндр 17 вместе с корпусом рамы 11.

Губки 24, имеющие Г-образную форму, подводятся к уплотнению. Подается сжатый воздух в верхнюю полость пневмоцилиндра 17. Поршень 15, в который упирается шток 14 пневмоцилиндра, жестко связанный с П-образной рамой 13 и с кольцом 12, перемещается вниз, а кольцо 12, воздействуя на рычаги, поворачивает их. При этом рычаги оканчивающимися

губками 24 разжимают (растягивают) кольцевое резиновое уплотнение.

При дальнейшем перемещении корпуса рамы 11 растянутое кольцевое уплотнение подводится к торцу оправки 1, а губки 24 рычагов 9 упираются в торцы пазов оправки.

Выпускается сжатый воздух с верхней полости пневмоцилиндра 17 и под действием пружины 16 рама 13 с кольцом 12 отпускает рычаги 9, и они, под действием пружин 8, отводятся от уплотнения. Уплотнение под действием упругости "садится" на край перед торцом оправки 1.

Выпускается сжатый воздух из нижней полости пневмоцилиндра 20. Поршень 21 под действием пружины 19 перемещается вниз вместе с рамой 11, отводя губки от оправки и возвращая механизм растяжения 23 в исходное положение.

Приводом (условно не показан) рычаг 29 с оправкой, на которой расположено растянутое кольцо, поворачивается на позицию установки уплотнения в канавку детали.

Деталь 31 подводится механизмом подачи и удаления детали 30 под оправку 1 и вводится внутрь нее до положения, пока торец оправки не будет расположен перед канавкой.

Срабатывает пневмоцилиндр 3. Перемещается шток поршня 5, поджатый пружиной 6, и ось 7 перемещает цилиндрический сбрасыватель 2 уплотнений. Растянутое уплотнение устанавливается во внутреннюю канавку детали 31.

При выпуске сжатого воздуха из верхней полости пневмоцилиндра 3 поршень со штоком и сбрасывателем 2 под действием пружины возвращается в исходное положение.

Рычаг 29 приводом возвращает оправку в исходное положение.

Удаляется деталь с установленным в ее канавке уплотнением с позиции сборки. Процесс установки уплотнения завершен.

Для надежной и качественной установки уплотнений необходимо обосновать силы растяжения, при которых не произойдет разрыв уплотнений и не приведет к появлению остаточных деформаций растяжения, что в свою очередь нарушит герметичность изделия.

Устройство растяжения уплотнения может иметь как три, так и четыре рычага с губками.

Рассмотрим случай, когда устройство имеет три рычага. При этом при растяжении уплот-

нение принимает вид, представленный на рис. 2, а.

С учетом длины огибания уплотнения губки 24 длину уплотнения по одной стороне будем считать равной  $l_2$ . Радиус наружной поверхности оправки 1 равен  $r_1$ . Длину полу дуги  $AB$  окружности обозначим  $l_1$ .

Из  $\triangle OAD$

$$\frac{l_2}{l_1} = r_1 / \operatorname{tg} 30; \quad (1)$$

$$l_1 = \frac{2\pi r_1}{6} = \frac{\pi r_1}{3}. \quad (2)$$

Удлинение  $l_2$  находим из выражения:

$$2\Delta l_2 = 2\left(\frac{l_2}{2} - l_1\right) = 2\left(\frac{r_1}{\operatorname{tg} 30} - \frac{\pi r_1}{3}\right). \quad (3)$$

Удлинение  $l_2$  при растяжении запишем [5]:

$$\Delta l = \frac{F_p l}{ES_p}, \quad (4)$$

где  $F_p$  — сила при растяжении,

$$F_p = P_p \cos 30; \quad (5)$$

$P_p$  — сила воздействия губок на кольцевое уплотнение;

$l$  — длина растягиваемого образца;

$E$  — модуль упругости материала;

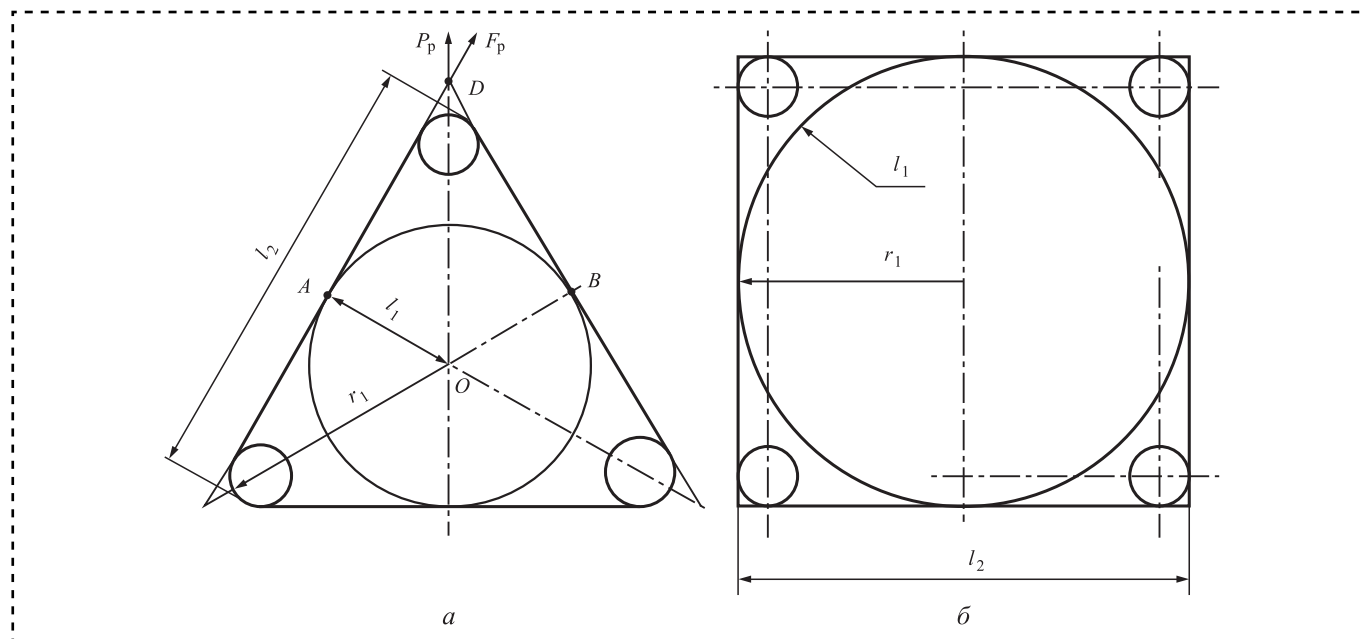


Рис. 2. Форма растянутого уплотнения:

а — растяжение в трех точках; б — растяжение в четырех точках



$S_p$  — площадь сечения уплотнения,

$$S_p = \frac{\pi d_y^2}{4}, \quad (6)$$

где  $d_y$  — диаметр сечения кольцевого уплотнения.

С учетом выражений (3), (5), (6) выражение (4) можно записать

$$2\Delta l_2 = \frac{4P_p \cos 30 l_2}{E\pi d_y^2}. \quad (7)$$

Окончательно сила растяжения уплотнения равна:

$$F_p = 2E \frac{\pi d_y^2}{4} \left( \frac{r_1}{\operatorname{tg} 30} - \frac{\pi r_1}{3} \right) / \frac{r_1}{\operatorname{tg} 30}. \quad (8)$$

Проверим на прочность сечение уплотнения [5]:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_p} \leq [\sigma_p]; \quad (9)$$

$$\sigma_p = \frac{4P_p \cos 30}{\pi d_y^2} \leq [\sigma_p]. \quad (10)$$

Если не выполняется условие (10), необходимо рассмотреть случай, когда резиновое уплотнение растягивается в четырех точках (рис. 2, б):

$$l_2 = 2r_1; \quad (11)$$

$$l_1 = 2\pi r_1/4 = \pi r_1/2; \quad (12)$$

$$2\Delta l_2 = 2(l_1 - l_2/2) = 2(r_1 - \pi r_1/4); \quad (13)$$

$$\Delta l = \frac{Pl}{ES}; \quad (14)$$

$$2\Delta l_2 = \frac{F_p 2l_2}{ES} = \frac{F_p l_2}{ES};$$

$$F_p = \frac{2\Delta l_2 ES}{l_2} = E \frac{\pi d_y^2}{4} 2 \left( r_1 - \frac{\pi r_1}{4} \right) / 2r_1;$$

$$F_p = P_p \cos 45;$$

$$\sigma_p = \frac{4P_p \cos 45}{\pi d_y^2}.$$

Обоснованы силы растяжения уплотнений для случаев — в трех и четырех точках.

#### Библиографический список

1. **Автоматизация** технологических и производственных процессов в машиностроении: учебник / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. проф. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ГНТ, 2018. 656 с.
2. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Устройства механизированной и автоматизированной сборки изделий. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярёва, 2015. 112 с.
3. **Уплотнения** и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
4. **Автомат** для установки уплотнений в комплекте с сопрягаемой деталью / Ю.З. Житников и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2002. № 4. С. 21 —24.
5. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов: учебник. М.: Наука, 1970. 595 с.



**П.В. Губарев, Т.З. Талахадзе, канд-ты техн. наук**

(Ростовский государственный университет путей сообщения),

**Н.Н. Зинченко**

(Ростовский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации)

E-mail: pavel.gybarev@yandex.ru

## Минимизация релейных схем в технических устройствах

*Определены требования и ограничения, накладываемые на синтезируемую схему. Рассмотрены приемы минимизации релейных схем в технических устройствах, основывающиеся на использовании аксиом, основных законов алгебры логики, действий с константами и некоторых правил. Сконструирована электрическая контактная схема, состоящая из контактов трех типов А, В и С. Сформулированы алгоритмы синтеза релейных автоматов.*

*The requirements and restrictions imposed on the synthesized circuit are determined. The techniques of minimization based on the use of axioms, basic laws of algebra of logic, actions with constants and some rules are considered. The electrical contact circuit has been designed consisting of contacts of three types A, B, and C. Algorithms for the synthesis of relay automata have been formulated.*

**Ключевые слова:** техническая диагностика, релейная схема, логический метод, задача, синтез, элемент, минимизация.

**Keywords:** technical diagnostics, relay circuit, logical method, task, synthesis, element, minimization.

Логические методы в применении к релейным устройствам позволяют решать задачу анализа — определение условий работы элементов для уже готовой схемы устройства — и обратную задачу, синтеза — нахождения схемы, удовлетворяющей заданным условиям работы, и, в частности, наилучшей схемы [1–6]. Эта задача более трудная, но и более важная с практической точки зрения. В задаче синтеза данная функция может иметь несколько схемных реализаций, и в каждом случае выбор может быть продиктован различными соображениями. Часто это бывают ограничения, накладываемые на стоимость схемы:

- наименьшее общее число элементов;
- наименьшее число исполнительных элементов, например, катушек реле;
- нагрузка на наиболее нагруженные элементы должна быть минимальной (задачи такого типа могут быть названы задачами распределения нагрузок);
- может быть поставлена задача равносильных преобразований, т.е. перехода от одной структуры к другой при точном сохранении соответствия структуры устройства условиям работы;

— гарантированная или максимальная надежность.

Перечисленные требования или ограничения, накладываемые на синтезируемую схему, могут быть взаимно исключающими. Формулировка задачи должна исходить из конкретных условий или обстоятельств. Минимизация — составная часть всех методов анализа и синтеза схем. Приемы минимизации основываются на использовании аксиом, основных законов алгебры логики, действий с константами и некоторых правил и приемов [7].

**Правило первое.** Если какой-либо контакт соединен последовательно со схемой, содержащей такие же или противоположные данному контакты, то такие же контакты надо закоротить, а цепи, содержащие противоположные контакты, удалить:

$$X(X \cdot Y + \overline{X} \cdot Z) = X(1 \cdot Y + 0 \cdot Z) = X \cdot Y.$$

**Правило второе.** Если какой-либо контакт соединен параллельно со схемой, содержащей такие же или противоположные данному контакты, то цепи, содержащие такие же контакты,



надо удалить, а противоположные контакты закоротить:

$$X + X \cdot Y + X \cdot Z = 0 \cdot Y + 1 \cdot Z = X + Z.$$

Названные правила применимы для последовательно-параллельных схем. В непоследовательно-параллельных (мостиковых) схемах параллельно или последовательно включенные элементы выделить невозможно. Поэтому такие схемы нужно предварительно преобразовывать путем разложения их структур по начальным или конечным элементам. Один из наиболее распространенных методов минимизации — метод Квайна. В этом методе используют две операции: склеивания и поглощения (удаление пары размыкающих и замыкающих контактов одного реле). Удобен в применении метод матриц Карно [8].

Введем понятие нормальных форм:

— дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ) называется дизъюнкция (логическая сумма) произведений переменных:

$$AB + A\bar{C} + \bar{A}BC;$$

— конъюнктивной нормальной формой (КНФ) называется конъюнкция (логическое произведение) сумм переменных:

$$(A + B + \bar{C}) \cdot (C + D) \cdot (\bar{A} + C).$$

В каждом слагаемом ДНФ или в сомножителе КНФ не обязательно присутствуют все ее переменные.

В совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ) и в совершенной конъюнктивной нормальной форме (СКНФ) членами каждого слагаемого (сомножителя) обязательно являются все переменные.

Рассмотрим, например, приведение формулы  $AB + B$  к СДНФ. Умножим второе слагаемое на выражение  $A + \bar{A}$ , эквивалентное единице (закон отрицания для дизъюнкции):

$$AB + B(A + \bar{A}).$$

После применения распределительного и переместительного законов имеем

$$AB + AB + \bar{A}B.$$

Применив закон повторения для дизъюнкции, окончательно получим

$$AB + \bar{A}B.$$

Рассмотрим использование законов алгебры логики и методов минимизации контактных схем на простом примере [9]. Предположим, нужно создать автоматическое устройство для оповещения машиниста трехсекционного электровоза о количестве включенных главных выключателей. Сигнальная лампа  $X$  на пульте машиниста головной секции электровоза должна гореть при включенном положении большинства из трех главных выключателей.

Нужно сконструировать электрическую контактную схему, состоящую из контактов трех типов  $A$ ,  $B$  и  $C$ , которая обеспечивала бы проводимость, равную единице (условие зажигания лампы), в случае нажатия кнопок включения любых двух или всех главных выключателей. При включенном положении лишь одного (любого) главного выключателя или при всех включенных лампа гореть не должна. Представим будущий автомат в виде "черного ящика" (рис. 1), т.е. в виде устройства с неизвестной пока внутренней структурой, который имеет три входа  $A$ ,  $B$  и  $C$  (по этим входам поступают сигналы 0 или 1 от главных выключателей) и один выход  $X$  (с него подается сигнал машинисту). Для определения структуры системы необходимо составить таблицу состояний выхода  $X$ , соответствующую всем возможным комбинациям состояний  $A$ ,  $B$  и  $C$  (таблица).

Для составления такой таблицы воспользуемся условиями, заданными в описании ав-

Таблица состояний

Входы			Выход	Входы			Выход
$A$	$B$	$C$	$X$	$A$	$B$	$C$	$X$
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1

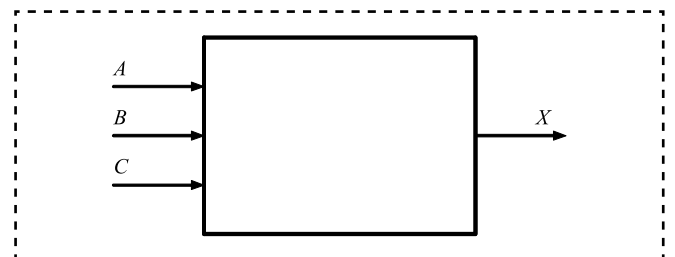


Рис. 1. Схема оповещения машиниста в виде "черного ящика"

томата, согласно которым сигнал 1 на выходе  $X$  должен появляться только в случаях, когда нажаты кнопки  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,  $A$  и  $B$ ,  $A$  и  $C$ ,  $B$  и  $C$ , во всех остальных случаях на выходе  $X$  появляется сигнал 0. Для составления структурной формулы из таблицы состояний выбираем строки, для которых значение состояния на выходе равно 1. Для каждой из выбранных строк записываем конъюнкцию выходных величин, значения которых равны 0. Логическая сумма (дизъюнкция) записанных конъюнкций, представляет собой структурную формулу

$$X = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} + ABC.$$

Эту формулу можно прочесть следующим образом: "Лампа устройства будет гореть только в том случае, если кнопка  $A$  не будет нажата и кнопка  $B$  будет нажата, и кнопка  $C$  будет нажата или кнопка  $A$  будет нажата, и кнопка  $B$  не будет нажата и т.д.". По существу, электрическая схема уже создана. Для ее построения нужно, кроме лампы и источника питания, использовать 12 контактов, включенных в четыре параллельные цепи по три контакта в каждой (рис. 2, *а*).

Используя упрощение изображения контактов, эту же схему можно показать иначе (рис. 2, *б*). Уменьшение числа контактов в этой схеме без нарушения условий работы — это и есть задача минимизации, которую будем

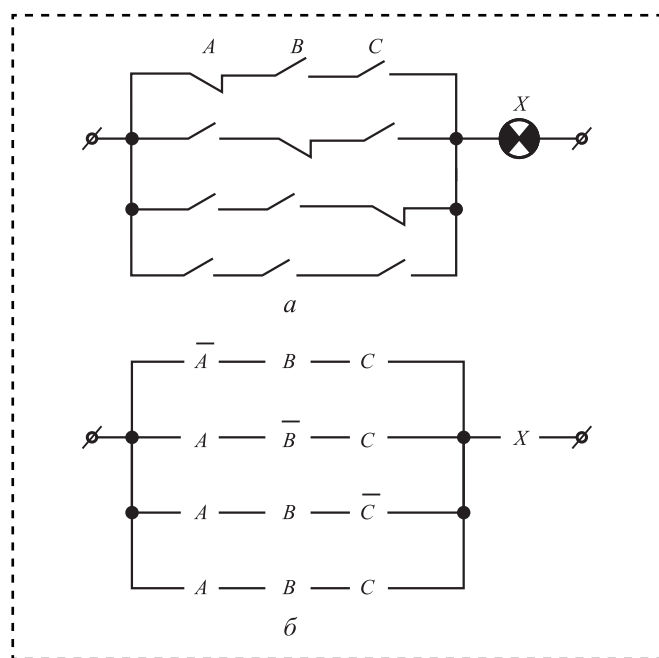


Рис. 2. Электрическая схема системы (*а*) и упрощенная электрическая схема системы (*б*)

решать, используя законы алгебры логики. Согласно распределительному закону структурная формула:

$$X = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB(\bar{C} + C).$$

С учетом закона отрицания для дизъюнкции выражение в скобках эквивалентно равно единице, поэтому его можно убрать (учитывается роль особого элемента 1).

Формула несколько упрощается

$$X = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB,$$

и схему можно построить, используя восемь элементов. Однако возможно ее дальнейшее упрощение. После применения к двум последним слагаемым первого распределительного закона получаем

$$X = \bar{A}BC + A(\bar{B}C + B).$$

Применение ко второму слагаемому второго распределительного закона позволяет записать:

$$X = \bar{A}BC + A(\bar{B} + B)(C + B).$$

Исключив выражение  $\bar{B} + B$ , равное единице, получаем  $X = \bar{A}BC + A(C + B)$ . Реализация схемы возможна на шести элементах. Тем не менее возможно ее упрощение

$$\begin{aligned} X &= \bar{A}BC + AC + AB = C(\bar{A}B + A) + AB = \\ &= C(\bar{A} + A)(B + A) + AB = C(A + B) + AB. \end{aligned}$$

Это и есть минимизированная структурная формула создаваемого автомата.

Соответствующая ей функциональная схема представлена на рис. 3, *а*, а схема на контактах, содержащая пять элементов, — на рис. 3, *б*.

Алгоритм синтеза релейных автоматов:

1. Дать словесное описание работы автомата.
2. Представить автомат в виде "черного ящика", указав входы и выходы.
3. Составить таблицу состояний автомата.
4. Записать структурные формулы для каждого выхода.
5. Упростить (минимизировать) полученные формулы.
6. Построить функциональную схему.
7. Исходя из имеющихся технических средств, составить принципиальную электрическую схему автомата [10—13].

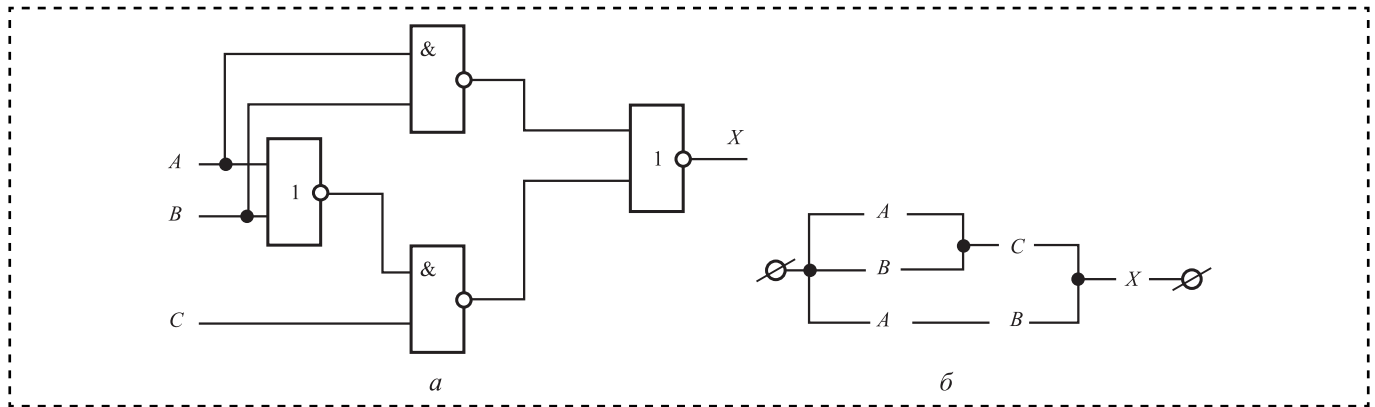


Рис. 3. Схема системы:

*a* — функциональная; *б* — на контактах

### Вывод

Рассмотрена минимизация релейных схем в технических устройствах, определены требования и ограничения, накладываемые на синтезируемую схему, рассмотрены приемы минимизации, основывающиеся на использовании аксиом, основных законов алгебры логики, действий с константами и некоторых правил, сконструирована электрическая контактная схема, состоящая из контактов трех типов *A*, *B*, и *C*, сформулированы алгоритмы синтеза релейных автоматов.

### Библиографический список

1. Губарев П.В., Глазунов Д.В., Мишихина Е.С. Анализ системы ремонта и диагностики локомотивов по фактическому состоянию // Тр. международной научно-практической конференции "Транспорт-2013". Ростовский Государственный университет путей сообщения. 2013. С. 143–144.
2. Тептиков Н.Р., Резниченко А.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В. Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 1. С. 13–15.
3. Резниченко А.А., Чеботарев Е.А., Тептиков Н.Р., Глазунов Д.В. Оценка безотказности и готовности локомотивов в период нормальной эксплуатации // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3 (39). С. 15–22.
4. Глазунов Д.В. Визуализация ротапринтного метода смазывания гребней колес подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2018. № 7. С. 70–72.

5. Майба И.А., Глазунов Д.В. Диагностика работы гребнерельсосмазывателя при помощи телевизионно-цифрового комплекса // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2010. № 3 (39). С. 24–29.

6. Кохановский В.А., Глазунов Д.В. Управление эксплуатационными показателями смазочного материала // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 54–58.

7. Теоретические основы построения логической части релейной защиты и автоматики энергосистем / под ред. В.Е. Полякова. М.: Энергия, 1979. 230 с.

8. Миллер Р. Теория переключательных схем. Т. 1. Комбинационные схемы. М.: Наука, 1970. 275 с.

9. Чеботарев Е.А. Методы диагностирования систем управления электровозов и электропоездов: Учебное пособие. Ростов-н/Д.: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2001. 80 с.

10. Майба И.А., Глазунов Д.В. Теоретическое обоснование механизма смешанной (полужидкостной) смазки в контакте "твердый оболочечный смазочный стержень—колесо—рельс" // Инженерный вестник Дона. 2012. № 1 (19). С. 223–232.

11. Кохановский В.А., Глазунов Д.В. Выбор компонентов смазочного материала для открытых узлов трения подвижного состава // Вестник машиностроения. 2016. № 3. С. 36–38.

12. Глазунов Д.В. Исследование значимости факторов, влияющих на ресурс смазочного материала в паре трения "колесо—рельс" // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 63–65.

13. Глазунов Д.В. Методика исследования трибологических характеристик компонентов смазочного блока, работающего в трибоконтакте "колесо—рельс" // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 3. С. 031–037.



**М.В. Вартанов**, *д-р техн. наук*, **В.К. Петров**, *канд. техн. наук*,  
**Чан Динь Ван, Нгуен Ван Зунг** (*Московский политехнический университет*)  
E-mail: m.v.vartanov@mospolytech.ru

## Анализ условий заклинивания при роботизированной сборке профильных соединений

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возникновения условий заклинивания при сборке профильных соединений. Приведена математическая модель процесса сопряжения в квазистатической постановке. Данные, получаемые из модели, позволяют определить теоретические граничные условия, определяющие возникновение заклиниваний. Рассмотрен способ повышения надежности сборки профильных соединений на основе применения средств адаптации. Обсуждается адекватность аналитического решения и результатов физического эксперимента.*

*The results of theoretical and experimental studies of jamming conditions during the assembly of profile joints are presented. A mathematical model of the conjugation process in a quasi-static setting is considered. The data obtained from the model allows you to determine the boundary conditions that determine the occurrence of wedges. A method for increasing the reliability of the assembly of profile connections based on adaptation tools is considered. The adequacy of the analytical solution and the results of the physical experiment is discussed.*

**Ключевые слова:** роботизированная сборка, условия заклинивания, профильные детали, этапы сопряжения, силомоментный датчик.

**Keywords:** robotic assembly, jamming conditions, profile parts, mating stages, force-torque sensor.

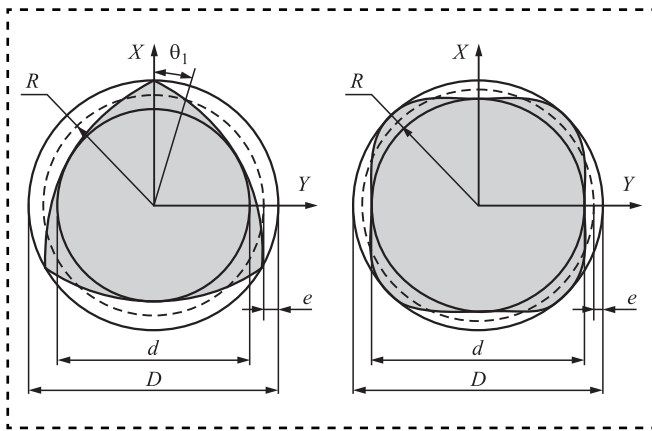
### Введение

В тридцатые годы прошлого века австрийский инженер Э. Краузе предложил процесс формообразования циклоидального профильного соединения. Фирма Ernst Krause & Co AG выпускала станки для лезвийной и шлифовальной обработки циклоидальных профилей, получивших условное название К-профиль. Трудности усовершенствования процессов формообразования циклоидальных профильных поверхностей вынудили в 1941 г. немецких инженеров Р. Мюссиля и Ф. Данзера разработать новую форму (названную РК-профиль) кривой поперечного сечения вала и втулки и процесс ее формообразования. Сущность процесса заключается в том, что режущему инструменту сообщают два поступательных прямолинейных гармонических движения (вдоль вертикальной и горизонтальной осей координат) с частотой, в  $K$  раз превышающей частоту вращения обрабатываемой заготовки.

В теории автоматической сборки условия собираемости цилиндрических соединений

изучены достаточно хорошо, а условия автоматической сборки профильных или многогранных валов — значительно хуже. В последние годы подобные соединения все шире используют в машиностроении, что объясняется рядом их преимуществ. В машиностроении профильные соединения используют в коробках скоростей и гитарах токарных и фрезерных станков, гибких модульных инструментальных системах, кузнечно-прессовом оборудовании, компрессорах и коробках передач автомобилей, а также в карданных валах сельскохозяйственной техники. Профильные соединения в основном предназначены для передачи крутящего момента сопряженными поверхностями деталей машин, режущих и вспомогательных инструментов, их применяют вместо шлицевых и шпоночных соединений. Профильные РК- и К-типы соединений характеризуются следующими геометрическими параметрами, представленными на рис. 1, а, б.

Эксплуатационные преимущества: усталостная прочность профильного вала в 4—5 раз



**Рис. 1. Геометрические параметры профильного вала РК-3 (а) и К-4 (б):**

$d$  — диаметр вписанной окружности;  $D$  — диаметр описанной окружности;  $R$  — радиус средней окружности;  $\theta_1$  — угловой параметр;  $e$  — эксцентриситет профиля

больше шлицевого; приработочный износ деталей РК-3 профильных соединений в 2,5–3 раза, а интенсивность установившегося износа в 1,8–2,4 раза меньше; крутильная жесткость выше в 1,3–1,6 раза; профильные соединения типа РК-3 и К-3 обладают свойством автоматического центрирования под передаваемой нагрузкой.

В практике машиностроения РК-профильные соединения используются в коробках скоростей и гитарах токарных полуавтоматов, выпускаемых фирмами Pittler, Vamessberger, а также

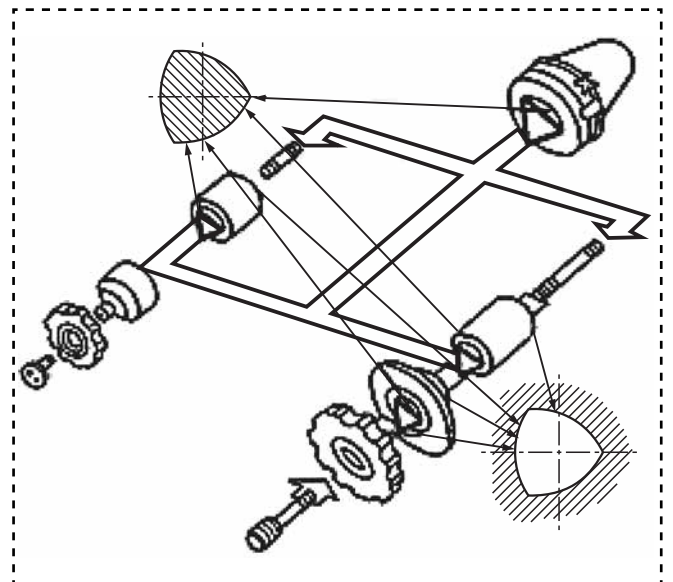


**Рис. 2. Инструментальные державки фирмы Sandvik (Швеция)**

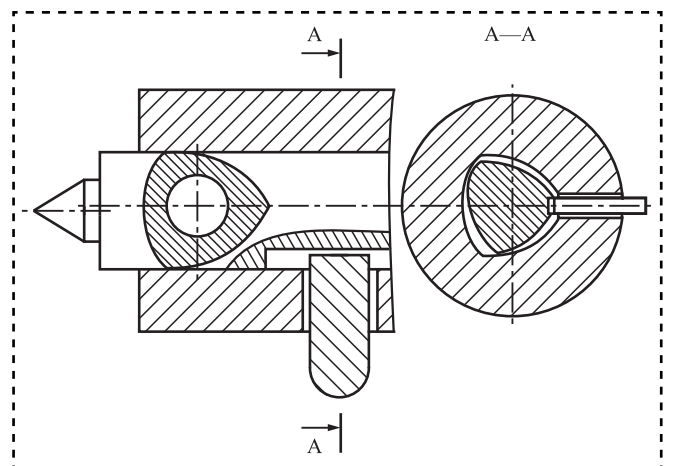
в устройствах отбора мощности коробок передач КАМАЗ (Россия), инструментальных державках фирмы Bendix (США) и Sandvik (Швеция) (рис. 2, 3) и пинолях задней бабки станка (рис. 4).

Фирмы Weasler Engineering Inc. (West Dend, Wisconsin, USA) и Bondioli & Pavesi S.p.A. (Италия) выпускают профильные карданные валы нескольких модификаций (рис. 5). Расширение использования профильных соединений в машинах одна из тенденций современного машиностроения, способствующая повышению конкурентоспособности продукции.

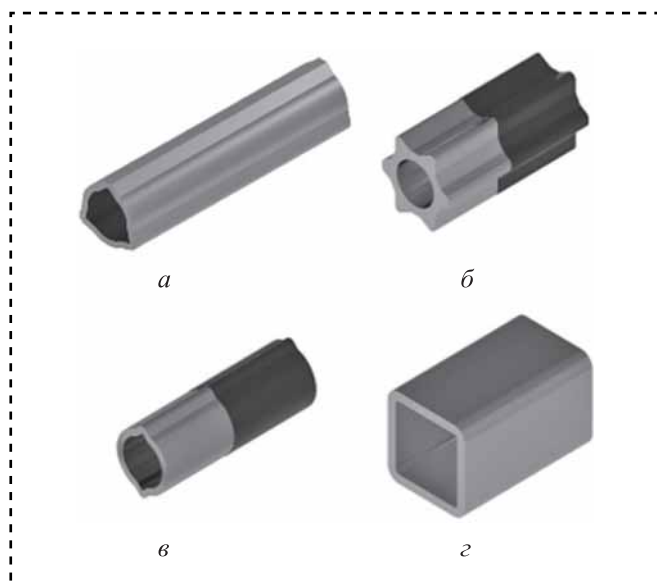
В практике сборочного процесса основная проблема — возникновение заклиниваний.



**Рис. 3. Гибкая модульная инструментальная система фирмы Sitzmann und Heinlein**



**Рис. 4. Пиноль задней бабки станка с профильным соединением**



**Рис. 5. Профильные трубы Weasler для карданных валов:** *a* — трехлопастная; *б* — звездообразная; *в* — лимонообразная; *г* — квадратная

Прогнозирование надежности сборочных операций — важная часть научных исследований на основе применения математических моделей и моделирования. Заклинивание деталей в промышленности приводит к снижению производительности и эффективности производства [1–3].

Заклинивание можно рассматривать как состояние, в котором вал не перемещается вследствие того, что приложенные к нему через схват робота силы и моменты находятся в неверных соотношениях [4–10]. При этом деталь жестко удерживается схватом робота. Вследствие этого, когда деталь находится в состоянии заклинивания происходит резкое уменьшение скорости перемещения при одновременном резком росте сборочных усилий.

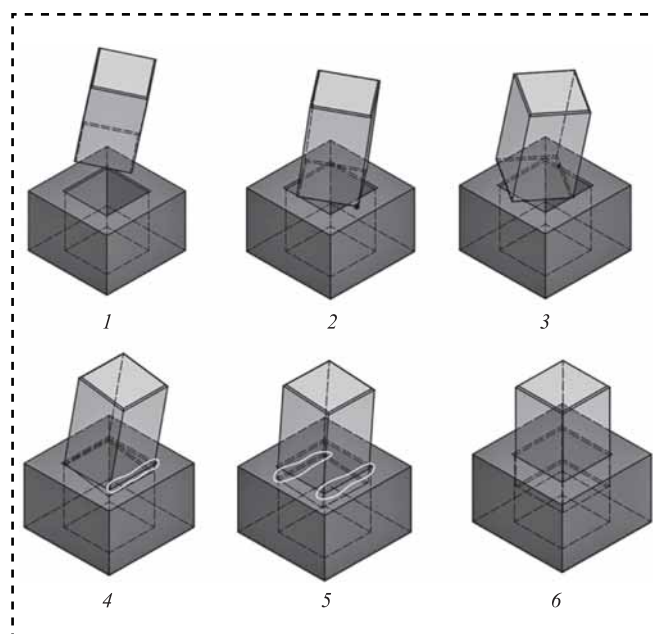
**Цель работы** — определение условий собираемости при сборке профильных валов и создание способа повышения технологической надежности роботизированной сборки на основе применения средств адаптации. Для этого требуется изучение возникающих контактных реакций и моментов при сборке профильных соединений. Для реализации способа сборки с адаптацией необходимо создание технологической оснастки и разработка схемы совмещения деталей, проведение физических экспериментов при использовании средств адаптации и жесткого базирования, с помощью силомоментного датчика определение сил и моментов,

возникающих при сопряжении, на основе чего можно обнаружить состояния заклинивания при сборке профильных соединений. Для этого требуется создание аналитической модели процесса сопряжения и определение реакции в точках контакта сопрягаемых деталей. Предполагается провести оценку адекватности моделей по результатам проведения физического эксперимента.

### Последовательность сборки профильных валов

Последовательность сборки профильных валов может быть разделена на шесть этапов (рис. 6): 1 — транспортирование соединяемых деталей на сборочную позицию; 2 — контакт вала с поверхностью втулки; 3 — трехточечный контакт "ребро—ребро"; 4 — контакт "ребро—грань"; 5 — контакт "ребро—грань"; 6 — завершение сборки.

Процесс автоматической сборки профильных соединений может быть рассмотрен как последовательность изменения контактных состояний, которые называются этапами сборочной операции. В начале процесса сборки вал подходит ко втулке по запрограммированной траектории и контактирует с ее поверхностью. Далее вал проходит различные контактные состояния.



**Рис. 6. Последовательность сопряжения квадратного вала со втулкой**

### Квазистатическая модель сборки профильных соединений

Рассмотрим случай контакта "ребро—грань" на этапе 5: нижний край вала контактирует с внутренней поверхностью отверстия. На рис. 7 приведена схема сил и моментов, действующих на вал. Чтобы составить уравнения равновесия, определим силы и моменты, действующие в координатной плоскости  $OXZ$ :

$$\begin{aligned} F_x + N_1 - N_2 \cos \theta + \mu N_2 \sin \theta &= 0; \\ -F_z + \mu N_1 + N_2 \sin \theta + \mu N_2 \cos \theta &= 0; \\ M_y - \mu \frac{w}{2} N_1 + \left( l - \frac{q}{\cos \theta} \right) N_1 - l N_2 \cos \theta + & \\ + \frac{w}{2} N_2 \sin \theta + l \mu N_2 \sin \theta + \frac{w}{2} \mu N_2 \cos \theta &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $l$  — глубина заклинивания.

Рассмотрим состояние предельного равновесия, когда силы трения покоя достигают максимального значения:

$$F_{\text{тр}1_{\text{max}}} = \mu N_1; \quad F_{\text{тр}2_{\text{max}}} = \mu N_2, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения покоя.

Из первых двух уравнений системы (1) можно получить силы реакции  $N_1$  и  $N_2$ :

$$\begin{aligned} N_1 &= -F_x + \frac{F_z + \mu F_x (\cos \theta - \mu \sin \theta)}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta}; \\ N_2 &= \frac{F_z + \mu F_x}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставим  $N_1$  и  $N_2$  из системы (3) в последнее уравнение системы (1):

$$\begin{aligned} M_y &= \left( -l + \mu \frac{w}{2} + \frac{q}{\cos \theta} \right) \times \\ &\times \left[ -F_x + \frac{(F_z + \mu F_x) (\cos \theta - \mu \sin \theta)}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta} \right] + \\ &+ \frac{\left[ \left( l - \frac{w}{2} \mu \right) \cos \theta - \left( \frac{w}{2} + l \mu \right) \sin \theta \right] (F_x + \mu F_x)}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta}. \end{aligned} \quad (4)$$

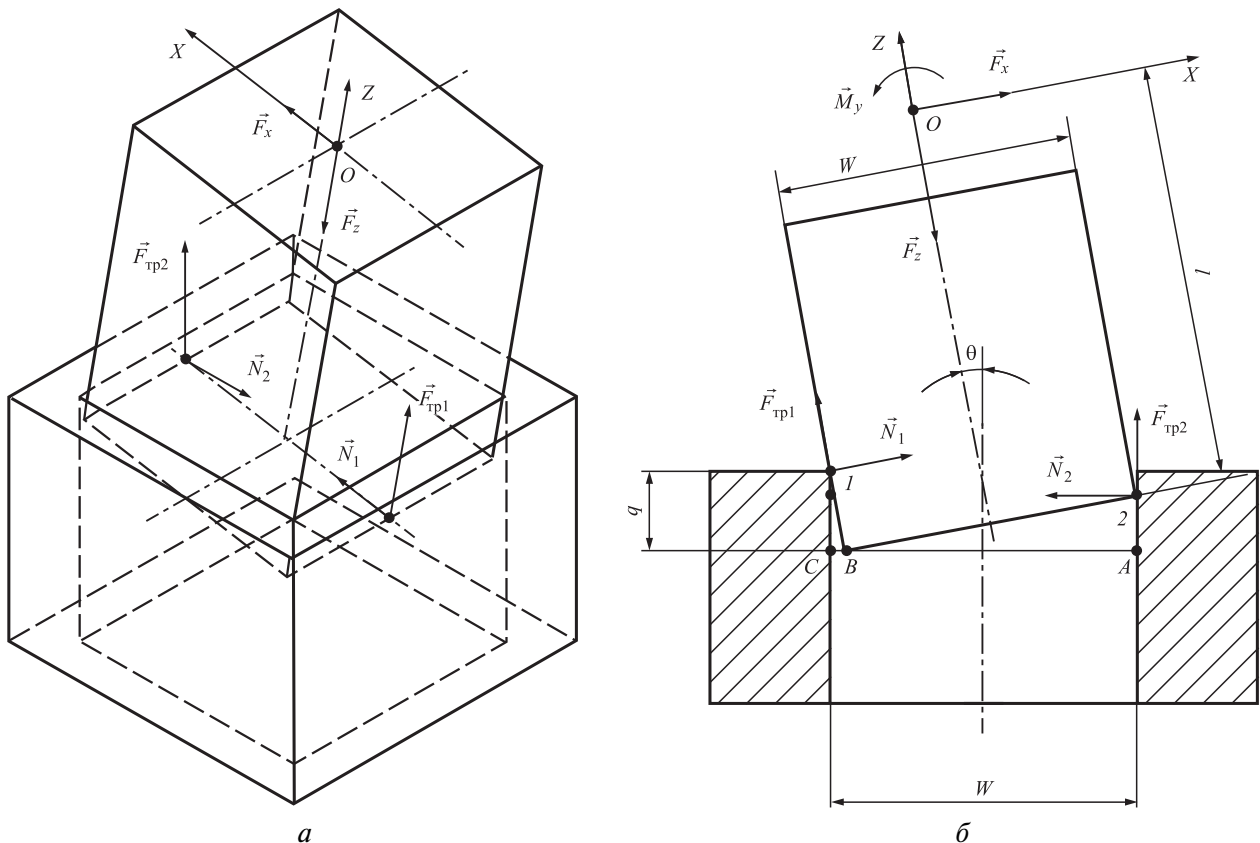


Рис. 7. Схема сил и моментов, действующих на вал в пространстве (а) и в координатной плоскости  $OXZ$  (б):

$\theta$  — угол перекоса оси вала и отверстия;  $W$ ,  $w$  — ширина сопрягаемых поверхностей соответственно отверстия и вала;  $q$  — глубина сопряжения

С учетом малых значений углов  $\theta$  принимаем:  $\cos \theta \approx 1$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ .

Тогда уравнение (4) приобретает вид:

$$M_y = \left(-l + \mu \frac{w}{2} + q\right) \times \left[-F_x + \frac{F_z + \mu F_x}{2\mu + (1 - \mu^2)\theta} (1 - \mu\theta)\right] + \left[l - \frac{w}{2}\mu - \left(\frac{w}{2} + l\mu\right)\theta\right] \left[\frac{F_z + \mu F_x}{2\mu + (1 - \mu^2)\theta}\right]. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой функцию, устанавливающую взаимосвязь момента  $M_y$  со значениями сил  $F_x$  и  $F_z$  в условиях предельного состояния системы по условиям трения. Угол  $\theta$  может быть найден из соотношения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &\approx \theta = \frac{AB}{q}; \\ BC &= w \cos \theta \approx w; \\ AB &= W - BC = W - w; \\ \theta &= \frac{AB}{q} = \frac{W - w}{q}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в (5), получим:

$$M_y = \left(-l + \mu \frac{w}{2} + q\right) \times \left[-F_x + \frac{(F_z + \mu F_x) \left(1 - \mu \frac{W - w}{q}\right)}{2\mu + (1 - \mu^2) \frac{W - w}{q}}\right] + \left[l - \frac{w}{2}\mu - \left(\frac{w}{2} + l\mu\right) \frac{W - w}{q}\right] \times \left[\frac{F_z + \mu F_x}{2\mu + (1 - \mu^2) \frac{W - w}{q}}\right]. \quad (7)$$

Показания выходных сигналов силомоментного датчика снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей координат: ось  $OZ_1$  направлена вдоль оси вала, а оси  $OX_1$  и  $OY_1$  ей перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения оси вала (на рисунках не показаны). С силомоментного датчика фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат  $F_{x1}$ ,  $F_{y1}$ ,  $F_{z1}$  и проекции вектора момента  $M_{x1}$ ,  $M_{y1}$ ,  $M_{z1}$ . Для решения поставленной

задачи необходимо представить силу в виде двух составляющих: осевой  $\vec{F}_z$  и радиальной  $\vec{F}_x$ , лежащих в плоскости контакта [5]:

$$\vec{F}_z = F_{z1} \vec{k}_1,$$

где  $\vec{k}_1$  — орт оси  $OZ_1$ .

Модуль силы  $\vec{F}_x$  можно определить как:

$$F_x = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2}.$$

Аналогичным образом определяем вектор момента. Получив с датчика проекции  $M_{x1}$ ,  $M_{y1}$  вектора  $\vec{M}_d$ , можно вычислить его модуль [5]:

$$M_d = \sqrt{M_{x1}^2 + M_{y1}^2}.$$

Таким образом, получены выражения для сил  $F_x$  и  $F_z$  с силомоментного датчика. Тогда по формуле (7) можно вычислить момент  $M_y$  (расчетный момент  $M_p$ ) и сравнить его со значением момента, полученным с датчика ( $M_d$ ).

В итоге могут быть определены условия реализации процесса:

$$M_d > M_p \quad \text{— условие заклинивания;}$$

$$M_d \leq M_p \quad \text{— условие сборки.}$$

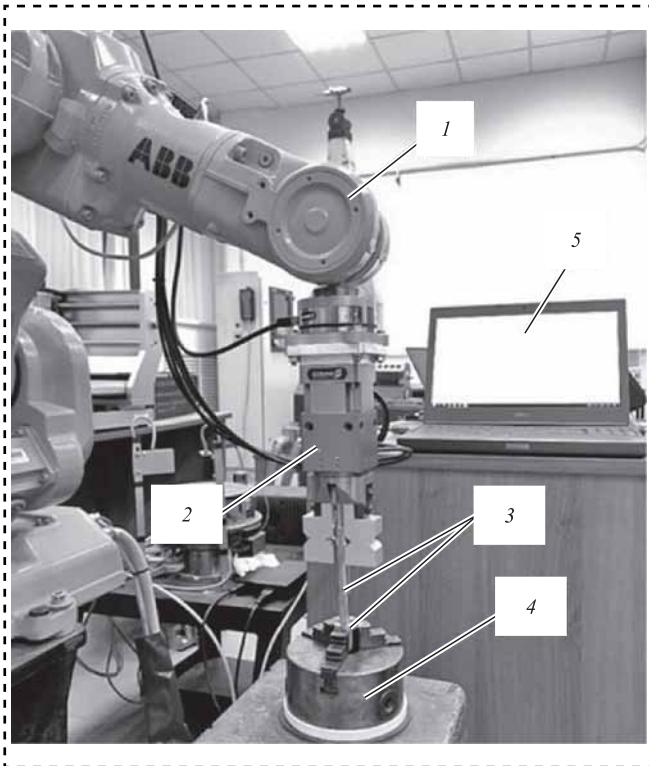
### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Эксперимент проводили с использованием установки, оснащенной силомоментным датчиком (рис. 8). Установка смонтирована на базе промышленного робота ABB IRB 140 с контроллером IRC5. Сопрягаемый вал жестко базируется в схвате робота, а втулка — в базовом приспособлении. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленного робота, а также регистрируется персональным компьютером.

Вал опускали на различную глубину сопряжения. Экспериментальные образцы изготовлены из стали 45. Коэффициент трения изменялся в диапазоне 0,15...0,2 [5]. Эксперимент проводили с квадратным валом при различных зазорах в соединении (рис. 9). Шаг приращения при сопряжении задан 0,5 мм и подбирался экспериментально.

Из экспериментальных результатов с жестким базированием (при этом втулку установ-

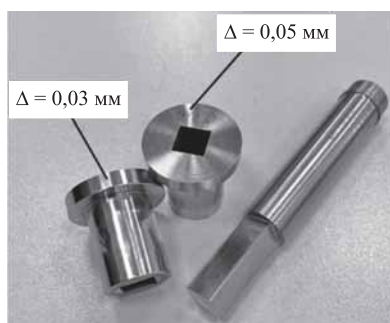




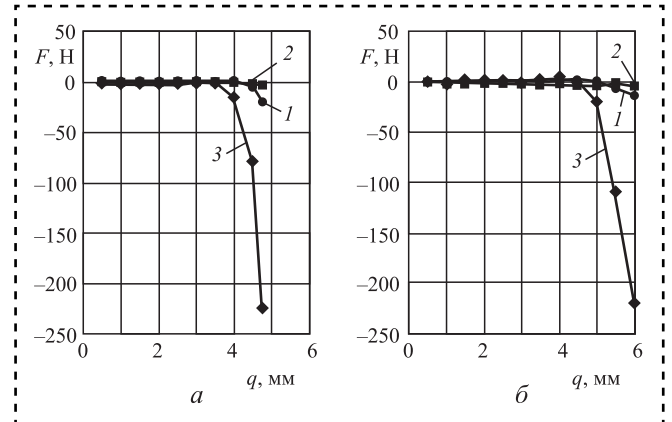
**Рис. 8.** Экспериментальная установка для исследования сборки профильных валов (схема без адаптации):

1 — промышленный робот ABB IRB 140; 2 — схват робота; 3 — экспериментальные образцы; 4 — базовое приспособление; 5 — персональный компьютер

ливали непосредственно в трехручачковый патрон) видно, что вектор силы сборки  $F_z$  резко увеличивается при возникновении заклинивания (рис. 10). В двух случаях при зазорах 0,03 и 0,05 мм заклинивание наступает практически в начале сопряжения на глубине  $l = 4...6$  мм. В данном диапазоне значение момента с датчика выше, чем значение расчетного момента (рис. 11). Причина заклинивания состоит в неправильном соотношении сил, действующих на присоединяемую деталь. Причинами заеданий



**Рис. 9.** Экспериментальные профильные образцы



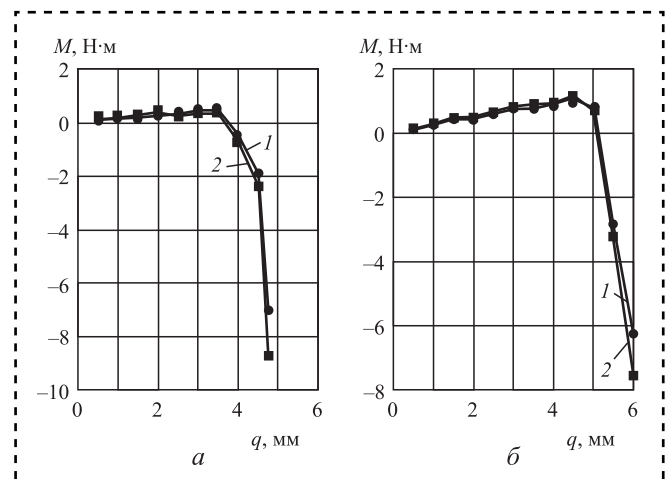
**Рис. 10.** Зависимость компонент главного вектора сборочных сил от глубины сопряжения:

а —  $\Delta = 0,03$  мм; б —  $\Delta = 0,05$  мм; 1 —  $F_x$ ; 2 —  $F_y$ ; 3 —  $F_z$

являются погрешности формы деталей сопряжения. При данном диапазоне глубин возникает состояние заклинивания и процесс остается незавершенным (табл. 1).

Чтобы избежать заклинивания и повысить надежность сборки профильных соединений, предложено применить адаптивную опору. Технологическая оснастка включает две части: первая — опора качения; вторая — сферическая опора (рис. 12).

Втулка располагается на опоре качения, которая свободно вращается относительно оси  $OZ$  и перемещается в плоскости  $OXY$  за счет качения шариков. Вторая опора может качаться относительно осей  $OX$  и  $OY$ . С помощью комплекта этих опор процесс сборки происходит безотказно (табл. 2).



**Рис. 11.** Сравнение расчетного и экспериментального момента для сопряжений с зазором 0,03 (а) и 0,05 мм (б):

1 —  $M_d$ ; 2 —  $M_p$



Таблица 1

## Результаты эксперимента при сборке квадратного вала

$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$q$	$M_d$	$M_p$
<i>Зазор 0,05 мм</i>							
0,37	-0,21	0,33	0,07	0,105	0,5	0,12	0,13
0,69	-0,59	0,047	0,24	0,14	1	0,27	0,28
0,90	-1,23	1,58	0,39	0,19	1,5	0,43	0,48
0,51	-1,50	1,44	0,43	0,12	2	0,44	0,50
0,90	-1,87	0,36	0,5	0,34	2,5	0,60	0,65
1,61	-2,10	0,0047	0,58	0,51	3	0,78	0,83
1,42	-2,42	2,193	0,69	0,43	3,5	0,81	0,90
1,76	-2,33	2,31	0,73	0,55	4	0,91	0,94
2,53	-2,56	1,388	0,79	0,74	4,5	1,08	1,14
0,85	-3,00	-19,07	0,75	0,109	5	0,76	0,75
-5,48	-1,72	-108,76	-0,27	-2,84	5,5	-2,86	-3,22
-13,71	-2,76	-222,02	-0,83	-6,15	6	-6,21	-7,56
<i>Зазор 0,03 мм</i>							
0,062	-0,44	-1,14	0,10	0,04	0,5	0,11	0,14
0,12	-0,61	-2,24	0,15	0,02	1	0,16	0,19
0,39	-0,79	-3,53	0,18	0,08	1,5	0,19	0,26
0,89	-0,91	-2,05	0,21	0,19	2	0,29	0,39
0,51	-0,62	-2,84	0,21	0,25	2,5	0,33	0,23
0,705	-0,85	-0,30	0,30	0,36	3	0,47	0,34
0,66	-0,91	-0,21	0,37	0,3	3,5	0,48	0,35
-0,068	-1,58	-15,04	0,42	-0,22	4	-0,47	-0,64
-4,62	-1,4	-78,84	-0,11	-1,91	4,5	-1,92	-2,37
-19,48	-3,46	-224,1	-0,94	-6,96	4,7	-7,02	-8,77

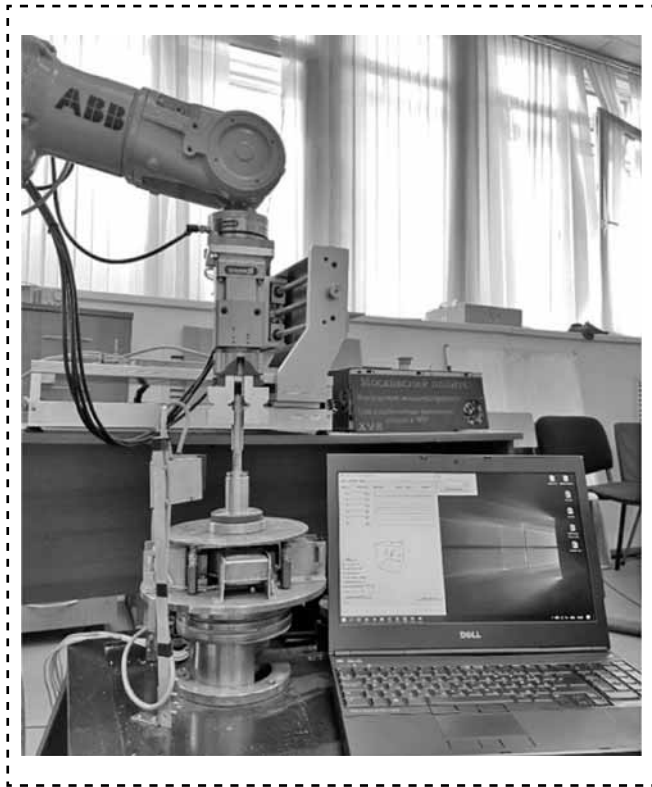


Рис. 12. Экспериментальная установка с адаптивной опорой

Анализ полученных результатов (рис. 13) показал, что использование предложенного метода обеспечивает более быстрое осуществление сборки (при сопряжении с зазором 0,03 мм получена глубина до 30 мм и сборочная сила не превышала 12 Н. При сопряжении с зазором 0,05 мм сила сборки меньше, чем 5 Н, а заклинивания отсутствуют в сравнении с жестким базированием.

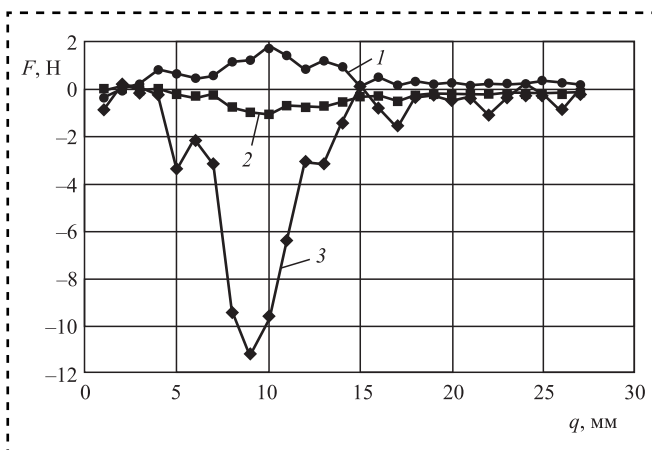


Рис. 13. Зависимость компонент главного вектора сборочных сил от глубины сопряжения при использовании средств адаптации при зазоре 0,03 мм:  
1 —  $F_x$ ; 2 —  $F_y$ ; 3 —  $F_z$

Результаты эксперимента  
при сборке квадратного вала после адаптации

$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$q$
<i>Зазор 0,03 мм</i>					
-0,40	-0,03	-0,88	0,03	-0,04	1
-0,03	0,12	0,18	-0,01	0,01	2
0,20	-0,08	0,05	0,01	0,04	3
0,83	-0,01	-0,27	0,01	0,15	4
0,65	-0,20	-3,44	0,07	0,22	5
0,44	-0,35	-2,14	0,09	0,16	6
0,52	-0,25	-3,22	0,09	0,23	7
1,12	-0,81	-9,39	0,38	0,46	8
1,22	-1,01	-11,32	0,49	0,62	9
1,78	-1,09	-9,69	0,52	0,73	10
1,39	-0,72	-6,42	0,35	0,56	11
0,80	-0,76	-3,10	0,30	0,32	12
1,20	-0,77	-3,18	0,31	0,39	13
0,94	-0,55	-1,50	0,23	0,31	14
<i>Зазор 0,05 мм</i>					
0,07	-0,31	0,11	0,11	0,06	15
0,49	-0,29	-0,82	0,12	0,16	16
0,19	-0,51	-1,63	0,15	0,12	17
0,32	-0,28	-0,35	0,12	0,11	18
0,21	-0,23	-0,29	0,09	0,08	19
0,23	-0,25	-0,52	0,07	0,05	20
0,13	-0,25	-0,32	0,07	0,08	21
0,22	-0,24	-1,11	0,09	0,09	22
0,20	-0,20	-0,44	0,08	0,07	23
0,19	-0,20	0,24	0,07	0,07	24
0,34	-0,18	-0,27	0,07	0,09	25
0,29	-0,18	-0,94	0,09	0,10	26
0,20	-0,13	0,03	0,07	0,07	27

## Заключение

Приведена последовательность сопряжения профильного соединения. С помощью сигналов силомоментного датчика можно обнаружить состояние заклинивания в зоне сопряжения, при которых необходимо введение корректирующих воздействий. В сравнении с цилиндрическими соединениями, у профильных чаще возникает состояние заклинивания из-за геометрической сложности формы.

С возрастанием зазора в зоне сопряжения состояние заклинивания менее вероятно. В состоянии заклинивания сигналы с силомоментного датчика всегда выше, чем расчетные, и имеет место резкое уменьшение скорости сопряжения при одновременном резком росте сборочных сил. Предложенный способ сборки с использованием опоры "качения-качания" дает хорошие результаты со значительным увеличением глубины сопряжения без заклинивания. Однако без применения средств адаптации наблюдалось 100%-ное заклинивание. Необходимо разработка алгоритма управления сборочным роботом на основе управления переходами между контактными состояниями сборочного процесса.

## Библиографический список

1. **Whitney D.E.** Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture and Role in Product Development. New York: Oxford University Press, 2004. 544 p. ISBN: 9780195157826.
2. **Xia Y.C., Bai Y.W., He Y.F.** Jamming and wedging analysis of non-rigid assembly with friction contact applied mechanics and materials // Journal of Applied Mechanics and Materials. 2010. Vol. 29—32. P. 183—189.
3. **Kim Y.L., Song H.C., Song J.B.** Hole detection algorithm for chamferless square peg-in-hole based on shape recognition using F/T sensor // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2014. Vol. 15. P. 425—432.
4. **Технология** автоматической сборки / А.Г. Холодкова и др.; под ред. А.Г. Холодковой. М.: Машиностроение, 2010. 560 с.
5. **Vartanov M.V., Van Dung N., Van T.D.** Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotic Assembly of Cylindrical Connection with Clearance // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2020. P. 977—981.
6. **Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. Технология сборки в машиностроении. Т. III — 5 / А.А. Гусев и др.; под общей редакцией Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 2001. 640 с.
7. **Справочник** по промышленной робототехнике: в 2 т. / под ред. Ноффа; пер. с англ. Д.Ф. Миронова. М.: Машиностроение, 1998. 480 с.
8. **Черняховская Л.Б.** Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. 75 с.
9. **Замятин В.К.** Технология и автоматизация сборки: учебник для машиностроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1993. 464 с.
10. **Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю.** Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях / под ред. В.С. Гурфинкеля и Е.А. Девянина. М.: Физматлит, 1994. 368 с.



**Е.А. Дубовик***(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)**E-mail: dubovik1982@list.ru*

## Сварка в среде углекислого газа при ремонте затворов ГЭС

*Рассмотрены процесс ремонта затворов ГЭС с помощью сварки в среде углекислого газа сварных односторонних соединений и применяемые методы контроля.*

*The process of repairing hydroelectric power plant gates by means of carbon dioxide welding of welded one-sided joints and the applied control methods are considered.*

**Ключевые слова:** затвор, проволока Св-08Г2С, приборы, сварка в среде углекислого газа, технология.

**Keywords:** gate, Sv-08G2S wire, devices, welding in carbon dioxide, technology.

Затворы гидроэлектростанций (ГЭС) предназначены для перекрытия водоспускных отверстий в бетонных или железобетонных гидравлических сооружениях. Затвор ГЭС представляет собой сварную металлоконструкцию, изготовленную из профильного и листового материалов (рис. 1). При работе затвор может быть открыт полностью или частично для пропускания воды в нижний бьеф.

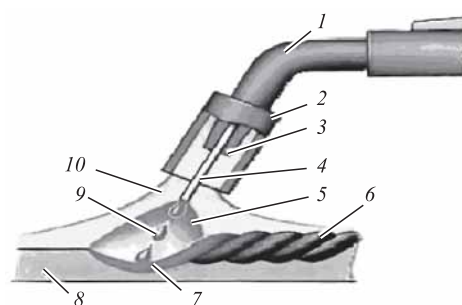
Маневрирование ремонтными затворами проводят в спокойной воде. Аварийные затворы применяют также для временного закрытия отверстий гидротехнических сооружений, но в случае аварии с основным затвором. Аварийные затворы должны спускаться в поток,



**Рис. 1.** Затвор ГЭС

подъем их обычно осуществляют после выравнивания напоров по обе стороны затвора. Аварийно-ремонтные затворы выполняют одновременно функции аварийных и ремонтных. Строительные затворы используют для закрытия водосбросных отверстий в период строительства. Общая масса конструкции около 700 кг.

Наибольшее распространение при сварке углеродистых и низколегированных сталей получили сварка и наплавка в среде углекислого газа — сварка плавящимся электродом (проволокой) с защитой сварочной ванны от воздуха углекислым газом (рис. 2). Такой способ является самым дешевым при сварке углеродистых



**Рис. 2.** Сварка в защитных газах:

1 — горелка; 2 — сопло; 3 — токоподводящий наконечник; 4 — сварочная проволока; 5 — дуга; 6 — сварной шов; 7 — сварочная ванна; 8 — свариваемый металл; 9 — капли электродного металла; 10 — газовая защита



и низколегированных сталей. Поэтому по объему производства он занимает одно из первых мест среди механизированных способов сварки плавлением. При сварке (наплавке) в среде углекислого газа из сопла горелки, охватывающей поступающую в зону горения дуги электродную проволоку, вытекает струя защитного газа, оттесняя воздух из сварочной ванны.

Наибольшее распространение при сварке в среде  $\text{CO}_2$  нашли электродные проволоки Св-08ГС, Св-10ГС, Св-08Г2С, Св-18ХГС и др.

Выбор материала сварной конструкции проводили на основании обеспечения жесткости и прочности с учетом наименьших затрат.

Сварку выполняли сварочной проволокой Св-08Г2С (ГОСТ 2246—70, ТУ 1227-220-10557608—2015).

По виду поверхности легированная проволока подразделяется: с покрытием медным слоем ("омедненная" — "О") и без применения покрытия. Омедненная продукция с сечением от 0,8 до 2,0 мм может иметь размер: 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 и 1,6 мм. Непокрытые изделия имеют сечение от 0,6 до 6,0 мм. Химический состав продукции в соответствии с нормативной документацией: С — 0,05...0,11 %; Мп — 1,8...2,1 %; Si — 0,70...0,95 %; S < 0,025 %; P < 0,03 %; Cu < 0,25 %. Общее содержание меди для проволоки с покрытием не более 0,3 % (с учетом покрытия медью, толщиной не менее 0,1 мкм). В состав также может входить не более 0,25 % никеля и не больше 0,2 % хрома.

Проволоку Св-08Г2С используют для сварки углеродистых и низкоуглеродистых сталей, которые применяются в машиностроительной отрасли, кораблестроении, строительстве, при ремонте различных изделий из углеродистых сталей. Особенно востребована проволока с медным покрытием, так как значительно увеличивает проводимость тока за счет уменьшения контактного сопротивления. Это дает возможность поддерживать равномерную дугу сварки и повышать качество сварного шва за счет отсутствия окисления.

Большой диапазон сечений проволоки дает возможность сварки разных по диаметру изделий, как тонких деталей, так и конструкций больших размеров. Например, сечение 2 мм часто применяют при ремонте небольших металлических предметов, продукция, сечением

до 6 мм применяется преимущественно в машиностроительной области для сварки громоздких конструкций.

Проволоку сварочную "омедненную" Св-08Г2С применяют:

в качестве соединяющего материала при проведении аргонодуговой сварки с использованием полуавтоматических сварочных аппаратов, а также при ручной сварке в среде аргона или его смеси с углекислым газом. Проволоку вводят в область сварного соединения, где она под действием пламени горелки расплавляется, а после отвердевания образует единое целое с металлом соединяемых деталей. Для аргонодуговой сварки применяют неплавящиеся вольфрамовые электроды;

в качестве присадки для образования флюса при выполнении ванной сварки. При расплавлении проволоки и сварных торцов металла, поднявшиеся вверх шлаки после остывания расплава образуют защитную пленку и предохраняют область шва от окисления;

для улучшения сварного шва за счет дополнительного легирования.

Технологическими преимуществами сварки в среде углекислых газов являются относительная простота процесса сварки, возможность полуавтоматической сварки швов, находящихся в различных пространственных положениях, что позволяет механизировать сварку в различных пространственных положениях. Небольшой объем шлаков, участвующих в процессе сварки в  $\text{CO}_2$ , способствует в ряде случаев получению швов высокого качества. Экономический эффект от применения сварки в углекислом газе всегда выше, чем при газовой и ручной дуговой сварке. Перечисленные технологические и экономические преимущества сварки в углекислом газе дают возможность широко использовать этот метод в серийном и массовом производствах.

Сущность этого вида сварки заключается в том, что электродная проволока (для защиты от коррозии ее часто покрывают тонким слоем меди) с повышенным содержанием кремния и марганца подается с постоянной скоростью в зону сварки; одновременно в эту зону поступает от баллона через редуктор углекислый газ, который обеспечивает защиту расплавленного или нагретого электродного и основного металлов от вредного воздействия окружающего воздуха.



При сварочном токе 200...250 А длина дуги должна быть в пределах 1,5...4,0 мм. Вылет электродной проволоки составляет 8...15 мм (уменьшается с повышением сварочного тока).

Для сварочных работ при ремонте затворов использовали два вида соединения сварных швов: таврового типа одностороннего шва Т1 (ГОСТ 14771—76) и углового типа одностороннего шва У1 ГОСТ 14771—76 (рис. 3). При этом константами являлись два параметра сварки в среде углекислого газа — плотность тока  $a$ , А/мм<sup>2</sup>, и диаметр электродной проволоки  $d_{э.п}$ , м.

Проведем расчет режимов сварки (наплавки) в углекислом газе.

Сила сварочного тока  $I_{св}$ , А:

$$I_{св} = \frac{\pi d_{э.п}^2 a}{4},$$

где  $d_{э.п}$  — диаметр электродной проволоки, мм;  
 $a$  — плотность тока в электродной проволоке, А/мм<sup>2</sup> ( $a = 110...130$  А/мм<sup>2</sup>).

Скорость подачи электродной проволоки, м/ч, рассчитывается по формуле:

$$v_{пр} = \frac{4\alpha_p I_{св}}{\pi d_{э.п}^2 \rho},$$

где  $\alpha_p$  — коэффициент расплавления проволоки, г/А·ч,  $\alpha_p = 3,0 + 0,08 \frac{I_{св}}{d_{э.п}}$ ;

$\rho$  — плотность металла электродной проволоки, г/см<sup>3</sup>.

Скорость сварки (наплавки)  $v_{св}$ , м/ч:

$$v_{св} = \frac{\alpha_n I_{св}}{100 F_B \rho},$$

где  $F_B$  — площадь поперечного сечения одного валика, см<sup>2</sup>;

$\alpha_n$  — коэффициент наплавки, г/А·ч,  $\alpha_n = \alpha_p(1 - \psi)$ ;

$\psi$  — коэффициент потерь металла на угар и разбрызгивание.

Масса наплавленного металла  $G_H$ , г: при сварке

$$G_H = F_{св} l \rho,$$

где  $V_{св}$  — площадь свариваемого металла, см<sup>2</sup>;

$l$  — длина шва, см;

при наплавочных работах

$$G_H = V_H \rho,$$

где  $V_H$  — объем наплавленного металла, см<sup>3</sup>.

Время горения дуги  $t_0$ , ч:

$$t_0 = \frac{G_H}{I_{св} \alpha_n}.$$

Полное время сварки (наплавки)  $T$ , ч:

$$T = \frac{t_0}{K_n},$$

где  $K_n$  — коэффициент использования сварочного поста.

Расход электродной проволоки  $G_{пр}$ , г:

$$G_{пр} = G_H(1 + \psi).$$

Расход электроэнергии  $A$ , кВт·ч, определяется по формуле:

$$A = \frac{U_d I_{св}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0(T - t_0),$$

где  $U_d$  — напряжение дуги, В;

$\eta$  — КПД источника питания;

$W_0$  — мощность источника питания, работающего на холостом ходу, кВт.

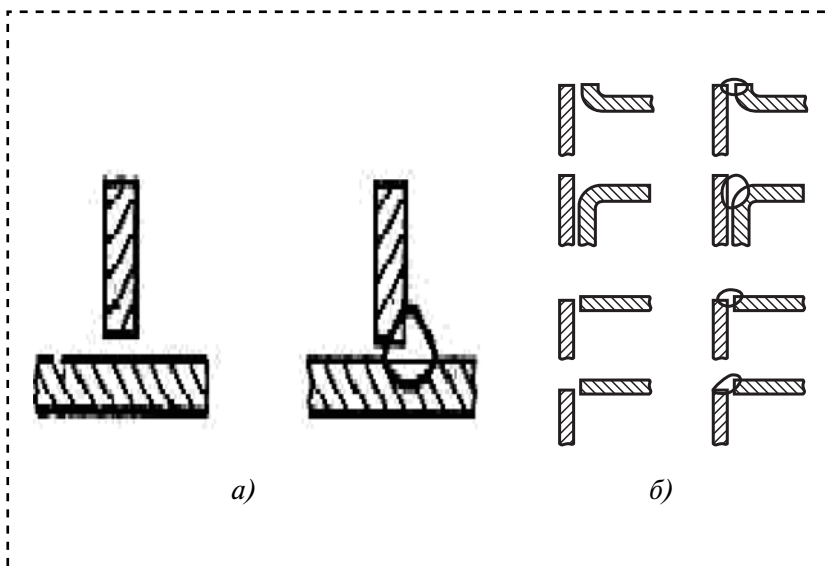


Рис. 3. Тавровое соединение типа одностороннего Т1 (ГОСТ 14771—76) (а) и угловое соединение типа одностороннего У1 (ГОСТ 14771—76) (б)

Число проходов для обоих свариваемых швов — один.

Визуально-измерительный контроль — самая практичная разновидность методов неразрушающего контроля. Он не требует специального оборудования контролера, предполагает лишь использование простых и недорогих инструментов. При этом он в подавляющем большинстве случаев оказывается достаточно информативным и позволяет выявить самые разнообразные дефекты. ГОСТ 23479—79 указывает и на применение конкретного оборудования и инструментов для качественного исследования визуальным способом. Так как

после сборки и проведения процесса сварки доступ к сварным швам будет возможен только с наружных сторон, то для контроля качества оптимальным вариантом является ультразвуковая дефектоскопия (УЗД) по ГОСТ 14782—76.

### Библиографический список

1. **Косилова А.Г., Мещерякова Р.К.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.

2. **Технология** конструкционных материалов: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский и др.; под общ. редакцией А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 2002. 512 с.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»**



## СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

*Под общей редакцией А.Г. Суслова*

**Цена 9500 руб.**      2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

**ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ**  
по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru);

редакции журнала: [sboraka@mashin.ru](mailto:sboraka@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 07.04.2021. Подписано в печать 19.05.2021. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солюшнз". Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.