

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

2020 Том 21  
4 (237)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Современные технологии сборки

Иванов А.А., Кретинин О.В. Сборка герметизированных контактов . . . . . 147

#### Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Задорина Н.А., Непомилуев В.В. Обеспечение качества сборки высокоточных изделий на основе метода индивидуального подбора деталей . . . . . 152

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

Щедрин А.В., Алешин В.Ф., Игнаткин И.Ю., Бугаев А.М., Чихачёва Н.Ю. Технологические машины трения для синтеза смазочных материалов, используемых при механической и комбинированной обработке . . . . . 158  
Эрлих Б.М. Задача активного воздействия на вынужденные колебания машин и механизмов с учетом нелинейностей пассивных сил . . . . . 161

#### В помощь конструктору, технологу

Лапшин В.П., Христофорова В.В., Халина Е.В. Моделирование динамики вибрационных движений индентора при выполнении операции выглаживания с учетом влияния термодинамической подсистемы . . . . . 166  
Розин А.Я. Технические решения вибробезопасности холодной клепки выполняемого судоремонта . . . . . 172  
Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Особенности многопользовательской работы с большими сборками на примере системы *Onshape* . . . . . 180

#### Подготовка специалистов

Борискин О.И., Анисимова М.А., Нуждин Г.А. Подготовка специалистов по метрологии в машиностроении . . . . . 187

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.  
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН  
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

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.  
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.

##### КОМСОМОЛЬСКИЙ-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.

##### РЫБИНСК

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

##### САМАРА

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

##### САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

##### ТОМСК

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

##### ТУЛА

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

##### ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

##### Беларусь

##### МИНСК

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

##### ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

##### Украина

##### КИЕВ

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

##### ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

##### Польша

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

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

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.

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

2020 Vol. 21  
4 (237)

### CONTENTS

#### Modern technologies in assembly

Ivanov A.A., Kretinin O.V. The assembly of hermetically sealed contacts . . . . . 147

#### Quality assurance. Testing. Monitoring

Zadorina N.A., Nepomiluev V.V. Ensuring the quality of assembly of high-precision products based on the method of individual selection of parts . . . . . 152

#### Friction & lubrication in machines and mechanisms

Shchedrin A.V., Aleshin V.F., Ignatkin I.Yu., Bugaev A.M., Chikha-  
cheva N.Yu. Technological friction machines for the synthesis of lubricants  
used in mechanical and combined processing . . . . . 158

Erlich B.M. The task of actively influencing forced oscillations machines and  
mechanisms taking into account nonlinearities of passive forces . . . . . 161

#### Industrial and design engineer's aid

Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Khalina E.V. Modeling of dynamics  
of vibration movements of the indenter during the smoothing operation taking  
into account the influence of the thermodynamic subsystem . . . . . 166

Rozinov A.Ya. Technical solutions of vibration safety cold riveting performed  
ship repair . . . . . 172

Samarkina E.I., Samarkin A.I., Dmitriyev S.I., Evgenyeva E.A. Features  
of multi-user work with large assemblies on the example of system *Onshape* . . . . 180

#### Preparation of experts

Boriskin O.I., Anisimova M.A., Nuzhdin G.A. Training in metrology sphere  
for machine building . . . . . 187

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  
E.A. MIKRIN  
B.V. SHANDROV  
A.G. KHOLODKOVA

#### Regional editors

##### VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN  
A.A. SUPONIA

##### VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL  
V.I. LYSAK

##### IZHEVSK

I.V. ABRAMOV  
V.G. OSETRV  
B.A. YAKIMOVICH

##### KAZAN

R.I. ADGAMOV

##### KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### KOMSOMLSK-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

##### 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

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

## Сборка герметизированных контактов

*Показано, что структура линии сборки герметизированных контактов во многом определяется положением собираемого изделия (горизонтальное или вертикальное). В их производстве применяется автоматическое оборудование линий как для горизонтальной, так и для вертикальной сборки. Технические характеристики обоих типов линий примерно одинаковы. Приведены оригинальные технические решения для ориентации и подачи контактов на сборку.*

*It is shown that the structure of the assembly line of sealed contacts largely determined by the position of the assembled product (horizontal or vertical). In their production, automatic equipment of the line is used, both for horizontal and vertical assembly. The technical characteristics of both types of lines are approximately the same. The original technical solutions for orientation and supply of contacts for assembly are given.*

**Ключевые слова:** линия горизонтальной сборки, линия вертикальной сборки, модуль центрирования, модуль герметизации, устройства ориентации и подачи.

**Keywords:** horizontal assembly line, vertical assembly line, centering module, sealing module, orientation and feeding devices.

Любые механические контакты коммутационных устройств подвержены износу. В целях снижения интенсивности износа используют герметизированный контакт (геркон), представляющий собой электромеханическое устройство, изменяющее состояние электрической цепи под воздействием магнитного поля на контактную группу из ферромагнитного материала.

Контакты геркона помещают в вакуумную колбу (или в колбу, заполненную инертным газом). Срабатывание устройства (например, замыкание контактов) происходит, если напряженность магнитного поля достаточна для преодоления порога упругости контактных выводов. В качестве источника магнитного поля используют постоянный магнит или электромагнит (рис. 1). При снятии магнитного поля контакты размыкаются под действием упругих сил.

В контактной паре между плоскими концами контактных выводов устанавливают зазор 0,1 мм. Перед герметизацией методом оплавления стекла корпус заполняют азотом, чтобы исключить искрение контактов. Контактные выводы изготавливают из кобальта (сплав никеля

с кобальтом с высокой магнитной проницаемостью). Ковар имеет примерно равный коэффициент объемного расширения со стеклом, что позволяет исключить растрескивание стекла при остывании после оплавления. Управление герконом осуществляют путем линейного или углового перемещения магнита.

### Технологическая схема сборки геркона (рис. 2):

I — подача на сборку и базирование стеклянного баллона (трубки);

II — подача контактных выводов лопаточками навстречу друг другу;

III — установка зазора 0,1 мм в контактной паре между плоскими концами контактных выводов и центрирование трех элементов прибора;

IV — герметизация корпуса методом оплавления стекла с помощью газовых горелок в среде азота;

V — контроль сборки и выгрузка собранного геркона с линии сборки.

Структура сборочной линии во многом определяется положением собираемого изделия

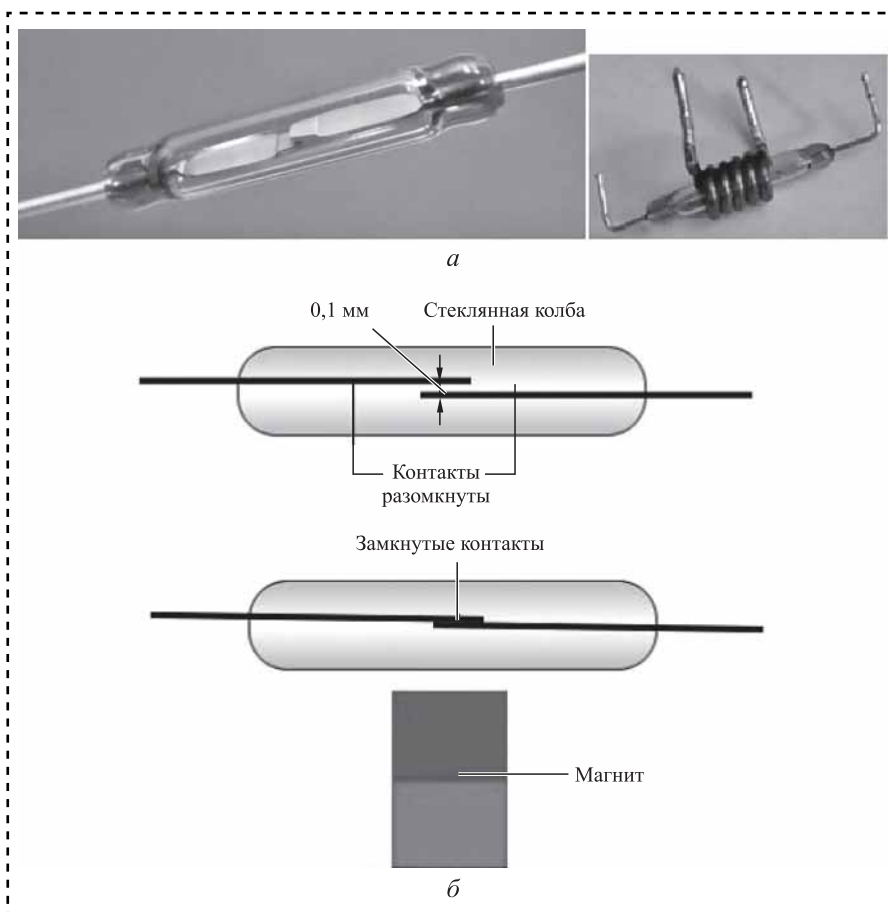


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема работы (б) геркона

(горизонтальное или вертикальное). В производстве герконов применяют автоматическое оборудование линии как для горизонтальной, так и для вертикальной сборки (рис. 3). Технические

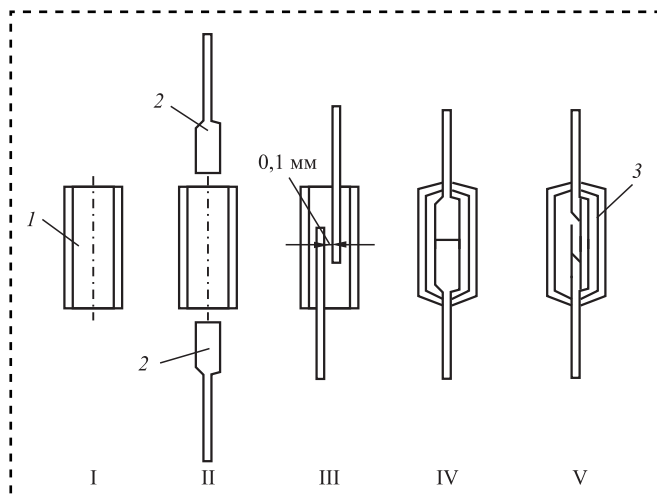


Рис. 2. Технология сборки геркона:

1 — стеклянный баллон (корпус); 2 — контактные выводы; 3 — геркон в сборе

характеристики обоих типов линий примерно одинаковы.

Подача на сборку стеклянного баллона-трубки представлена на рис. 4.

При подаче на сборку контактный вывод должен быть сориентирован по расплюсченному концу в виде лопаточки. Для ориентации выводов используют вибромагнитную систему, которая включает в себя линейный вибротранспортер и соленоид (рис. 5).

В этой системе стержень 1 горизонтально перемещается по вибротранспортеру и попадает в магнитное поле соленоида 3, расположенного под транспортером (см. рис. 5). Стержень становится магнитным диполем и под действием момента  $M(F_M)$  магнитных сил, приложенных к концам диполя, начинает поворачиваться, стремясь занять в средней зоне соленоида положение, близкое к вертикальному. Параметры магнитной системы должны обеспечивать поворот стержня в вертикальной плоскости на

угол  $\varphi > \pi/2$  в случае его движения плоским концом вперед и на угол  $\varphi < \pi/2$  в случае движения круглым концом вперед. В первом случае за счет попадания плоского конца 2 стержня в прорезь 4 транспортера он оказывается ближе к соленоиду и переориентируется на  $180^\circ$ . Во втором случае стержень проходит над соленоидом без поворота на  $180^\circ$ . Затем стержни попадают в вертикальный магнитный накопитель всегда лопаточкой вверх. Для этого метода ориентации должна быть предложена надежная система поштучной выдачи тонких стержней из вибробункера.

Существует вариант вибромагнитной системы для ориентации и сортировки выводов на два транспортных потока.

Система включает вибробункер 1, два вибротрубки 6 (нижний) и 7 (верхний), ориентирующий электромагнит с полюсами 3, вертикальные магнитные накопители 4, 8 и магнитные шибберные захваты 5 (рис. 6). Выводы 2 поступают из вибробункера 1 поштучно на верхний вибротрубок 7, ориентируясь вертикально в магнитном поле между полюсами 3. Выводы, ориентированные лопаточкой вниз, проваливаются в продоль-

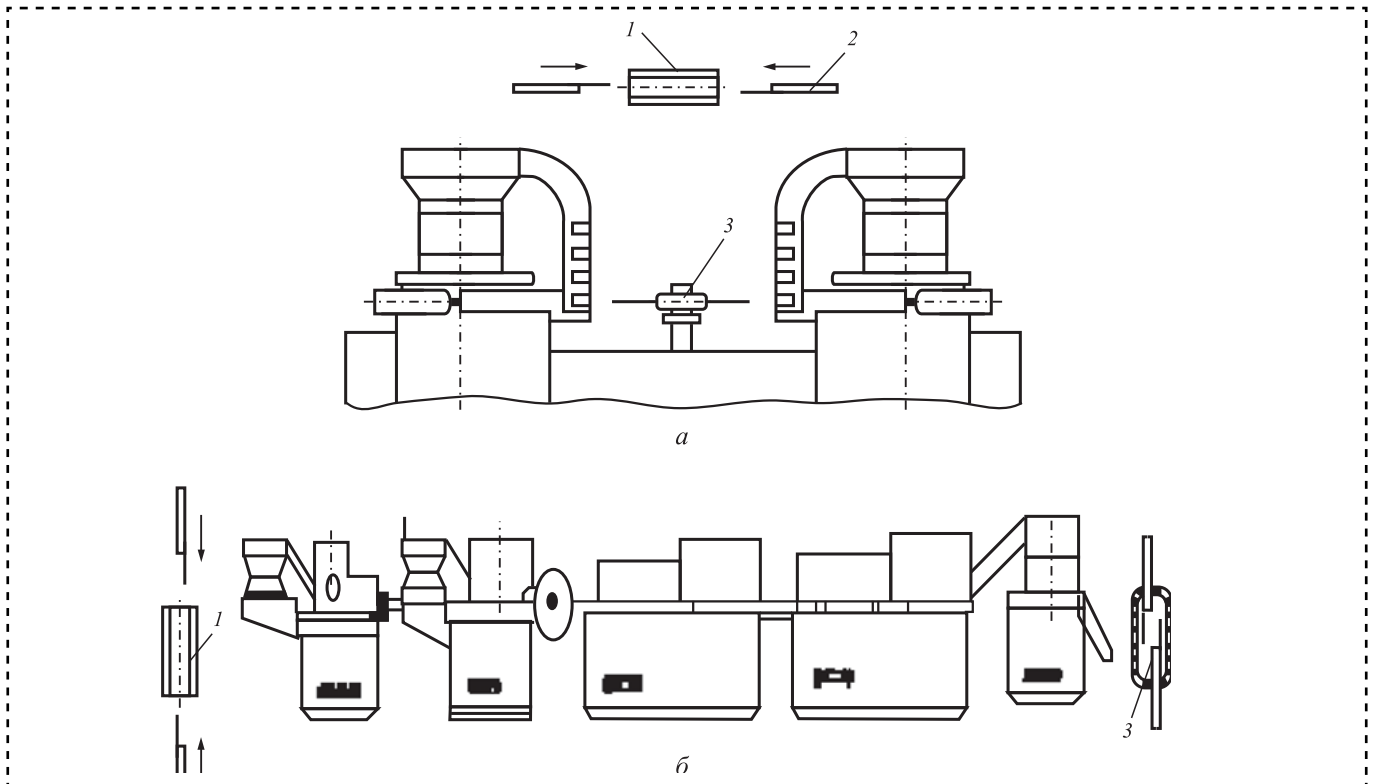


Рис. 3. Организация автоматизированного сборочного процесса при горизонтальном (а) и вертикальном (б) размещении объекта:

1 — стеклянный корпус; 2 — контактный вывод; 3 — геркон

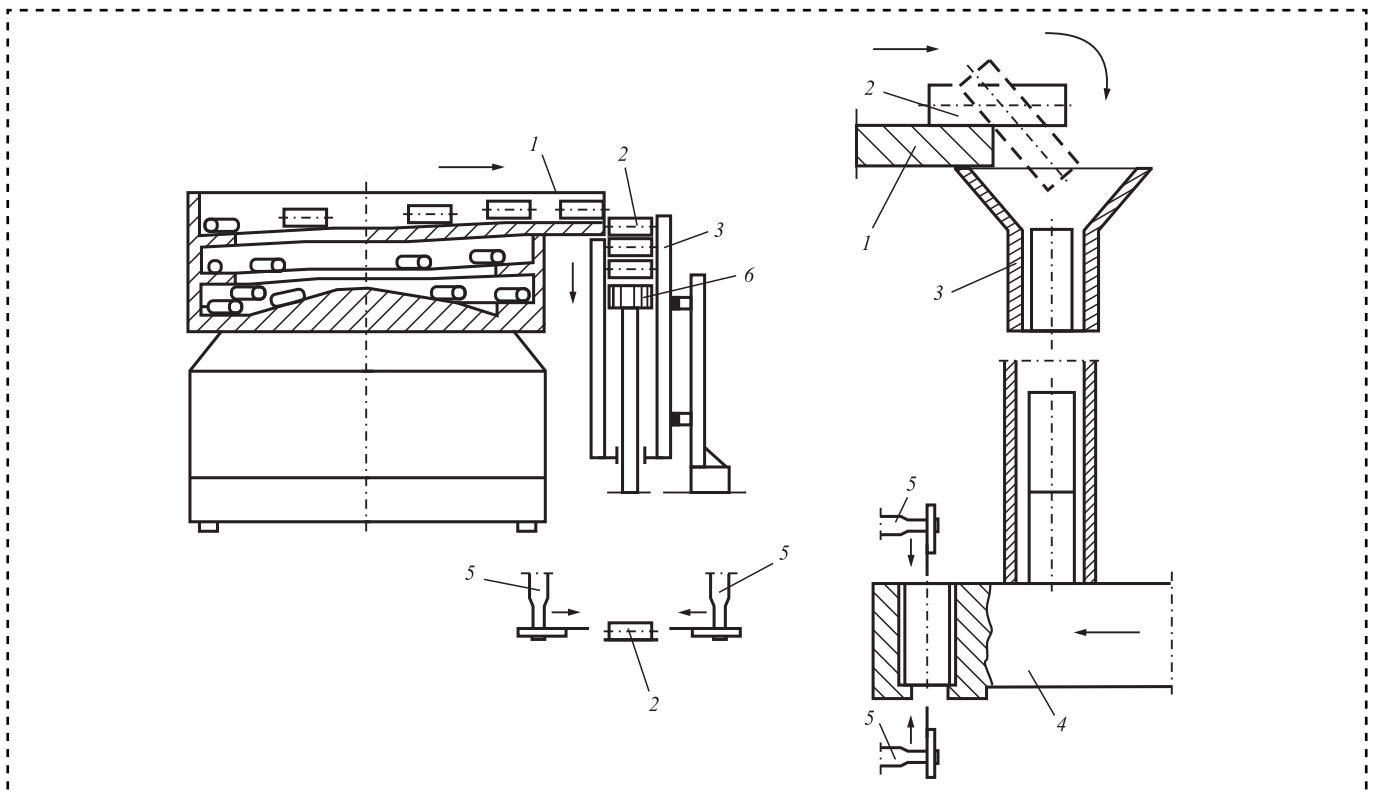
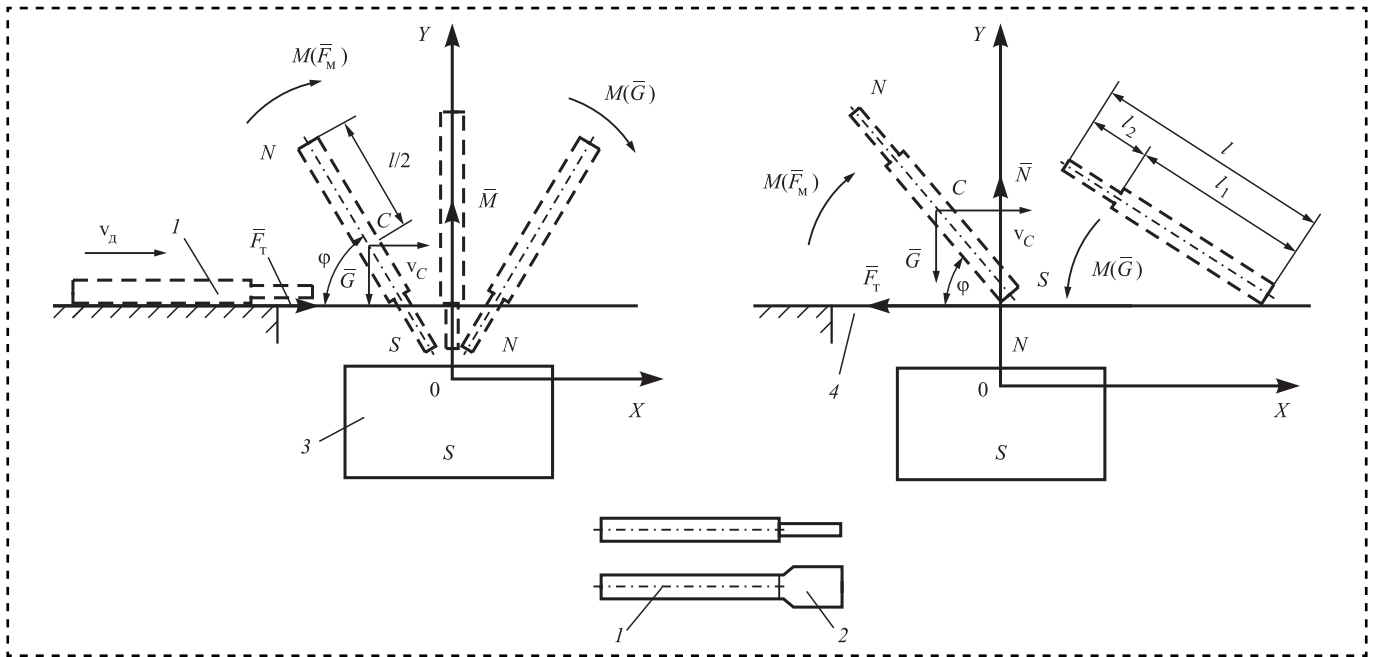


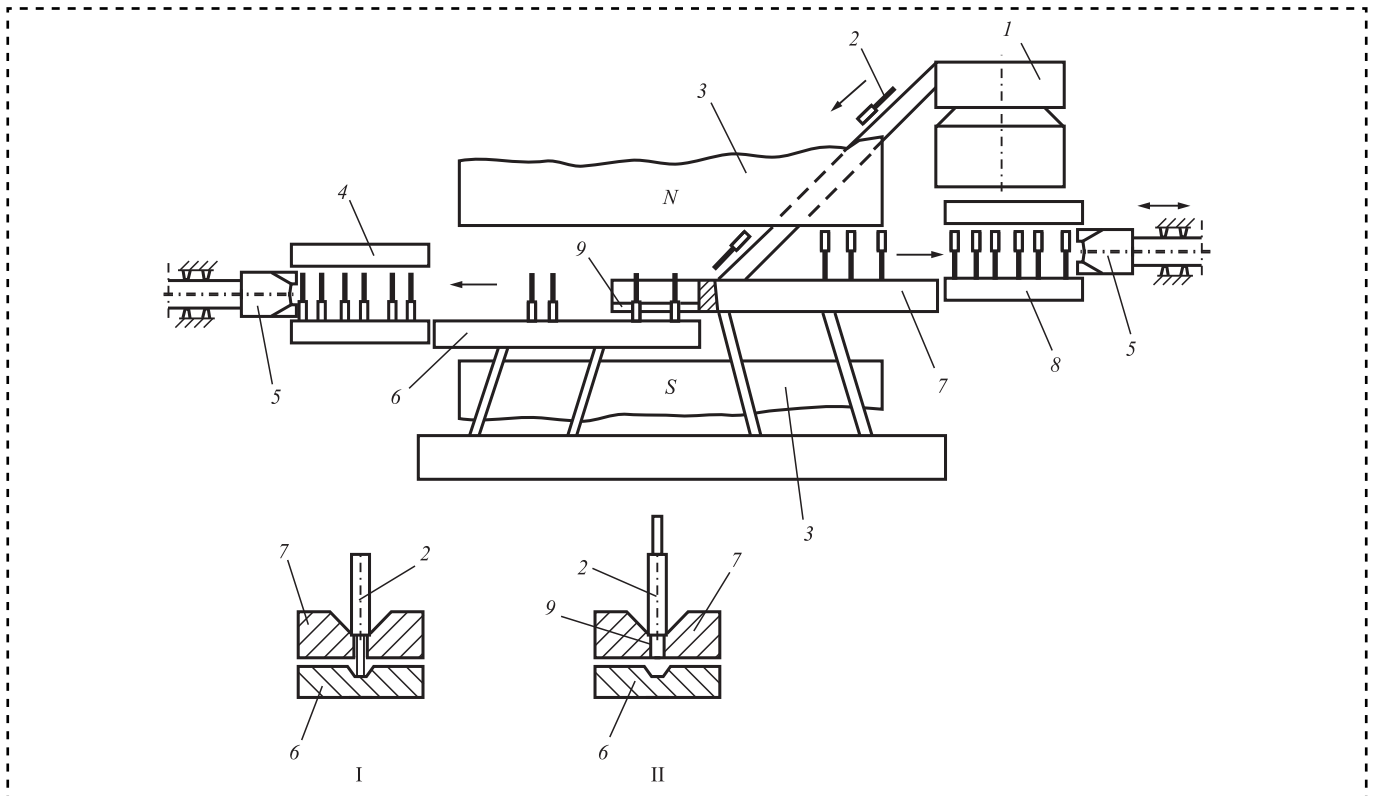
Рис. 4. Схемы ориентации и подачи стеклянного корпуса в случае горизонтальной (а) и вертикальной (б) сборки геркона: 1 — выходной лоток; 2 — стеклянный корпус; 3 — пенальная кассета; 4 — шиббер подачи корпуса; 5 — держатель контактного вывода; 6 — поршень кассеты



**Рис. 5. Схема ориентации асимметричного стержня с несмещенным центром масс в магнитном поле соленоида:**  
 1 — стержень; 2 — расплющенный конец стержня; 3 — соленоид; 4 — продольная прорезь в вибротранспортере

ную щель 9 на верхнем вибрлотке 7 (поз. I) и по нижнему вибрлотку 6 поступают в магнитный накопитель 4. Выводы, ориентированные лопа-

точкой вверх, проходят по верхнему вибрлотку 7 в магнитный накопитель 8, так как цилиндрический конец вывода не проваливается в узкую



**Рис. 6. Схема ориентации и сортировки контактных выводов геркона на два транспортных потока:**  
 I — стержни лопаточкой вниз движутся по нижнему вибрлотку; II — стержни лопаточкой вверх движутся по верхнему вибрлотку; 1 — вибробункер; 2 — стержень; 3 — полюса электромагнита; 4, 8 — вертикальные магнитные накопители; 5 — магнитные захваты; 6, 7 — вибрлотки; 9 — продольная щель в лотке

щель 9 (поз. П). Таким образом, в накопителе 4 располагаются выводы лопаточкой вниз, а в накопителе 8 — лопаточкой вверх. Подача на сборку выводов из магнитных накопителей 4, 8 выполняется магнитными шиберными захватами 5.

### Модуль центровки выводов в корпусе и установки требуемого зазора в контактной паре

Установка зазора в контактной паре проводится путем центрирования выводов 4 относительно оси корпуса 1 с помощью разъемных конусов 2 и подвижных держателей 5 (рис. 7). Захваты контактов могут перемещаться линейно и вращаться вокруг собственной оси. При подтверждении результатов контроля зазора в контактной паре корпус и выводы жестко фиксируются, обеспечивая сохранение геометрии изделия, половинки 3 конуса отводятся и начинается операция герметизации.

### Модуль герметизации корпуса геркона

На операции герметизации половинки 3 центрирующего конуса удаляются из корпуса 1 и подводятся сопла 2 газовых горелок (рис. 8). Последовательно оплавляется стекло верхнего, и затем нижнего торцов корпуса в среде инертного газа (например, азота).

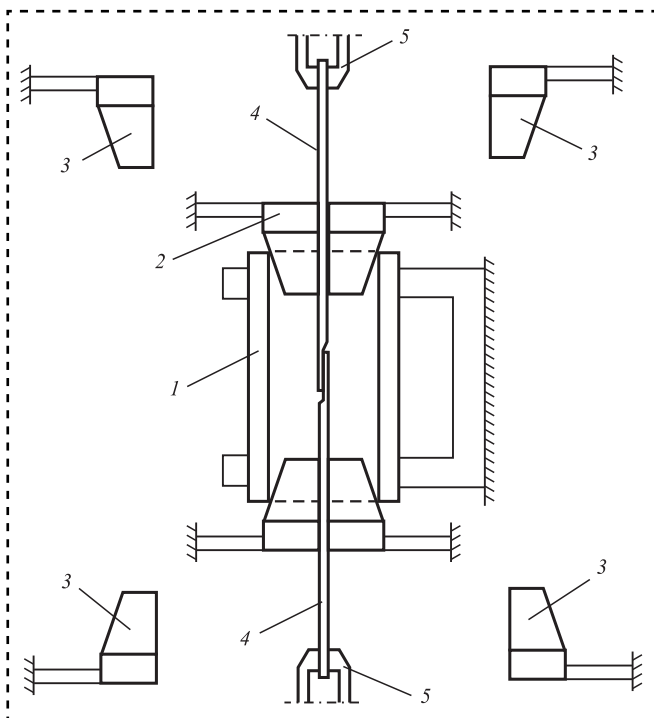


Рис. 7. Схема центрирования выводов относительно корпуса с помощью разъемных конусов:

1 — стеклянный корпус; 2 — разъемный конус; 3 — половинки конуса; 4 — вывод; 5 — подвижный держатель вывода

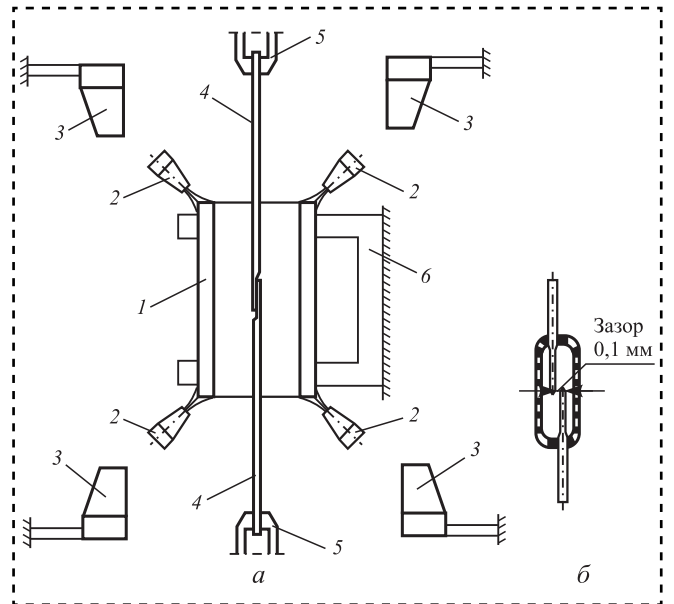


Рис. 8. Схема герметизации геркона с помощью двух пар оппозитных газовых горелок (а) и геркон в сборе (б):

1 — стеклянный корпус; 2 — газовая горелка; 3 — половинки центрирующего конуса; 4 — контактный вывод; 5 — держатель вывода; б — держатель корпуса

В основном варианте герметизация проводится двумя оппозитными горелками, в альтернативном варианте используется одна горелка, которая вращается вокруг оси корпуса на  $360^\circ$ .

### Заключение

Показано, что структура линии сборки герконов во многом определяется положением собираемого изделия (горизонтальное или вертикальное). В производстве герконов применяется автоматическое оборудование линии, как для горизонтальной, так и для вертикальной сборки. Технические характеристики обоих типов линий примерно одинаковы. Определяющими в линии являются: модуль установки требуемого зазора в контактной паре и центровки выводов и модуль герметизации стеклянного корпуса геркона.

Приведены оригинальные технические решения для ориентации и подачи контактов на сборку с разделением на два транспортных потока, обеспечивающих питание двух сборочных позиций от одного загрузочного устройства.

### 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, 2012. 336 с.
3. Иванов А.А. Проектирование систем автоматизированного машиностроения: учебник. М.: ФОРУМ, 2013. 298 с.

**Н.А. Задорина, В.В. Непомилуев, д-р техн. наук**

(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)

E-mail: vvvvnpn@yandex.ru

## Обеспечение качества сборки высокоточных изделий на основе метода индивидуального подбора деталей

*Приведены результаты исследования метода индивидуального подбора деталей при сборке машин, содержащих многозвенные размерные цепи. Показано, что использование предлагаемого алгоритма подбора деталей позволяет существенно повысить точность таких машин при небольших затратах и обеспечить требуемое качество их сборки.*

*The results of a study of the method of individual selection of parts when assembling machines containing multi-link dimensional chains are presented. It is shown that the use of the proposed algorithm for the selection of parts can significantly increase the accuracy of such machines at low cost, which makes it possible to provide the required quality of their assembly at a lower cost.*

**Ключевые слова:** сборка, качество, размерная цепь, индивидуальный подбор деталей, компьютерное моделирование.

**Keywords:** assembly, quality, dimensional chain, individual selection of parts, computer simulation.

### Введение

При создании машины возникает задача трансформации требований к качеству машины в требования к качеству деталей. При этом учитывают следующие факторы:

— эксплуатационные показатели обычно не задают напрямую как требования к качеству деталей, поскольку они проявляются только в процессе работы готовой машины;

— показателями качества деталей назначают параметры, которые достаточно легко проконтролировать, и которые связаны с требуемыми эксплуатационными показателями;

— на показатели качества деталей задают независимые допуски, поскольку отсутствуют информационные связи между технологическими процессами изготовления деталей;

— используемые в настоящее время технологии сборки, как правило, неуправляемы в отношении процесса суммирования погрешностей и не учитывают индивидуальных особенностей каждой конкретной детали.

Например, вибрационные характеристики гибкого ротора газотурбинного двигателя

(ГТД) определяют действительную форму его оси, распределение локальных дисбалансов, расположение главных центральных осей инерции деталей относительно оси ротора и другие параметры. Однако в процессе сборки контролируют и другие параметры качества, которые не характеризуют однозначно качество собираемого гибкого ротора, например, допустимые биения контрольных поверхностей или суммарный технологический дисбаланс.

Аналогичная ситуация существует и при сборке других изделий, например высококачественных оптических систем. Здесь также основные эксплуатационные показатели (абберация, дисторсия, астигматизм и др.) не могут быть проконтролированы до завершения процесса сборки.

Отмеченные выше факторы приводят к тому, что для обеспечения эксплуатационных показателей машины требования к качеству деталей существенно, иногда до предела, завышаются. Так, базовые поверхности основных деталей гибких роторов газотурбинных двигателей изготавливают по 5–6-му уровням точности. Со сверхвысокой точностью изготавливают и линзы высококачествен-



ных фотообъективов: "Если увеличить линзу объектива (диаметром около 100 мм) до размера футбольного стадиона "Маракана" в Рио-де-Жанейро (около 300 м), то отклонения профиля поверхности будут меньше толщины пластикового пакета (0,03 мм)!" [1].

Но даже несмотря на это, количество нуждающихся в доработке изделий может достигать 20...80 %, что вынуждает проводить многочисленные повторные сборки, подбирая эмпирическим путем детали или пригоняя их.

Так, при изготовлении ротора смешанной барабанно-дисковой конструкции (рис. 1), в котором детали роторного пакета последовательно базируются и крепятся друг к другу (что приводит к последовательному же суммированию их погрешностей), для использования метода полной взаимозаменяемости необходимо обеспечить допуски на радиальные и осевые биения деталей порядка 1 мкм, что практически невозможно в настоящее время.

Особенности сборки роторов такого типа:

- качество собираемого изделия можно оценить только после окончания процесса сборки, когда появляется ось ротора;
- возможен разворот деталей друг относительно друга при сборке (для ротора, состоящего из  $N$  деталей возможно  $M^{N-1}$  равноценных с конструктивной точки зрения вариантов относительного расположения его деталей, где  $M$  — число вариантов расположения каждой детали, определяемое числом призонных болтов);
- при сборке контролируются осевые и радиальные биения контрольных поверхностей;
- качество изготовления ротора определяется положением в пространстве центров тяжести и главных центральных осей инерции деталей относительно оси ротора.

В целях компенсации погрешностей изготовления деталей проводят так называемую технологическую сборку, в процессе которой контролируют осевые и радиальные биения и при их несоответствии заданным осуществляют разворот сопрягаемых деталей вокруг формируемой оси вращения (это допускается конструкцией узла) для достижения заданного уровня биений. Применение метода компенсации погрешностей позволяет значительно снизить технологический дисбаланс ротора за счет взаимной компенсации векторов технологических дисбалансов отдельных деталей. Тем не менее опыт показывает, что даже в этом случае на заключительных этапах сборки и балансировки часто выявляются роторы со значительными отклонениями биений и дисбалансов от допустимых. Это вынуждает искать новые способы повышения качества машин.

#### Исследование возможностей метода подбора деталей для сборки высокоточных изделий

Метод индивидуального подбора деталей основан на предваряющей сборку рассмотрении всех или некоторой части возможных вариантов сочетания собираемых деталей и выборе лучшего из них для практической реализации.

Предпосылки применения метода индивидуального подбора:

- непрерывное повышение требований к качеству изготавливаемых изделий;
- исчерпание возможностей существующих методов;
- компьютеризация рабочих мест как технологов, так и непосредственно рабочих-сборщиков.

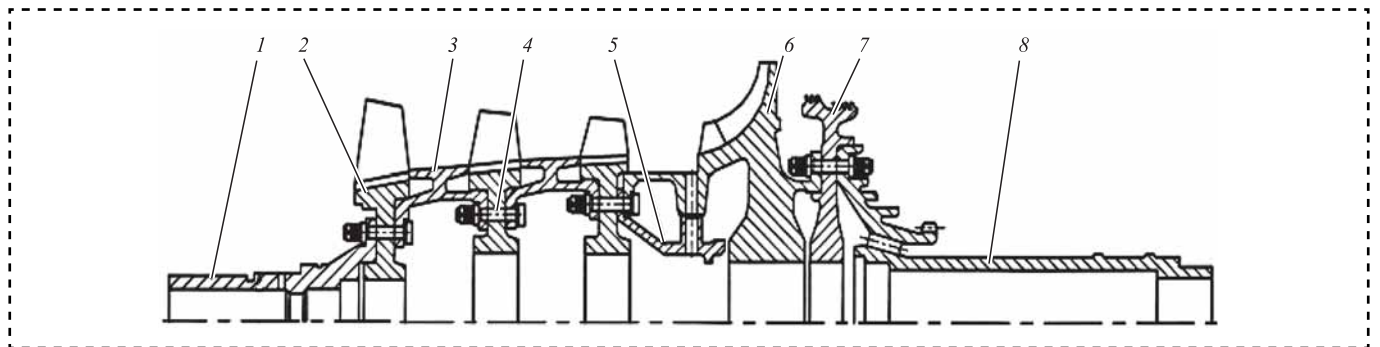


Рис. 1. Ротор компрессора газогенератора ГТД:

1 — цапфа передняя; 2 — диск; 3 — проставка; 4 — болт призонный; 5 — коллектор; 6 — крыльчатка центробежной ступени; 7 — диск-лабиринт; 8 — цапфа задняя

Метод индивидуального подбора может быть использован для сборки высокоточных изделий в ситуации, когда необходимое качество изготовления деталей существенно превышает возможности имеющихся методов изготовления деталей.

Однако непосредственное применение такого способа при сборке реального изделия, когда количество возможных вариантов соединения деталей может превышать десятки миллионов, невозможно. В этом случае необходима автоматизация процесса индивидуального подбора деталей с помощью компьютера и превращение метода индивидуального подбора в компьютерную технологию [2]. Для автоматизации процесса индивидуального подбора необходима компьютерная модель, имитирующая процесс индивидуального подбора. Компьютерное моделирование технологического процесса сборки основано на построении и использовании математических моделей. Таким образом, метод индивидуального подбора становится компьютерной технологией, в основе которой исследование реального процесса сборки через поведение его адекватной математической модели. Такой подход позволяет осуществлять оптимальную комплектацию собираемого узла и, рассматривая имеющиеся детали и все возможные варианты их относительного расположения в изделии, определять их оптимальное сочетание и относительное положение. Это дает возможность, несмотря на некоторое увеличение трудоемкости контроля и комплектации, резко снизить общую трудоемкость сборки.

Виртуальная сборка включает в себя все существенные признаки и явления физически выполняемой сборки [2]. Однако необходимый для достижения наилучшего результата полный перебор всех возможных вариантов соединения деталей — чрезвычайно трудоемкая вычислительная задача. Поэтому актуальна разработка более "экономного" алгоритма, позволяющего получить "хорошее" решение при рассмотрении сравнительно небольшого количества вариантов.

Рассмотрим задачу подбора деталей при сборке как оптимизационно-комбинаторную [3]. В такой постановке задача заключается в поиске минимума целевой функции на множестве допустимых решений  $D$ :

$$f(\bar{x}) \rightarrow \min, \bar{x} \in D, \quad (1)$$

где  $D = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n\}$  — множество допустимых решений;

$$\bar{x}_i \in \Omega_i, i = 1, \dots, n;$$

$\Omega_i$  — конечное множество значений  $\bar{x}_i$ ;

$$\bar{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\};$$

$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$  — действительные размеры деталей  $A_1, A_2, \dots, A_m$ .

Множество допустимых решений представляет собой множество векторов всех возможных вариантов соединений.

Определение целевой функции  $f(\bar{x})$  во многом зависит от конкретной задачи. Например, целевая функция может представлять собой значение разброса  $\Delta x_i$  на множестве размеров  $x_i$  всех полученных изделий:

$$f(\bar{x}) = \max_i \left( \sum_{j=1}^m x_{ij} \right) - \min_i \left( \sum_{j=1}^m x_{ij} \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$
$$\bar{x} \in D,$$

где  $\max_i \left( \sum_{j=1}^m x_{ij} \right)$  — максимальный размер изделия;

$\min_i \left( \sum_{j=1}^m x_{ij} \right)$  — минимальный размер изделия

для полученного варианта решения.

Можно предложить и другие варианты определения целевой функции  $f(\bar{x})$ , которые будут зависеть от схемы размерной цепи.

Так как множество допустимых решений дискретно, то данную задачу можно рассматривать как задачу комбинаторной оптимизации. Подходы к решению подобных задач разделяют на две группы: точные и приближенные. Очевидно, что точное решение сформулированной таким образом задачи дает только метод полного перебора всех возможных вариантов решения. Однако практическое применение этого метода решения ограничено, так как число возможных вариантов по мере увеличения числа звеньев цепи и объемов партий деталей, а с ними и трудоемкость решения задачи растут очень быстро.

Подходы, относящиеся ко второй категории, включают прием, который можно назвать "снижение требований". Он заключается в отказе от поиска оптимального решения и в нахождении вместо этого хорошего решения за приемлемое время. Именно такой подход предлагаем использовать для решения задачи подбора деталей.

В работе [4] для моделирования процесса сборки с использованием индивидуального подбора деталей предложен приближенный метод решения — алгоритм частичного случайного перебора, в основу которого положены генетические алгоритмы оптимизации.

Генетический алгоритм — метод, основанный на использовании аналогий с природными процессами естественного отбора и генетических преобразований, предназначенный для решения оптимизационных задач. Генетический алгоритм — разновидность эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи. Его отличительной особенностью является акцент на использование оператора "скрещивания", который проводит операцию рекомбинации решений-кандидатов (рис. 2).

Алгоритм частичного случайного перебора представляет собой эвристический алгоритм поиска решения путем случайного подбора и комбинирования звеньев в размерной цепи. Возможные варианты соединения деталей в цепи получаются с помощью операции рекомбинации изделий-кандидатов, которые выбираются случайным образом.

Кратко идея алгоритма заключается в следующем:

- 1) формируется массив данных. Каждая строка массива — цифровая модель изделия;
- 2) для полученного решения вычисляется значение целевой функции. Все строки массива данных помечаются как необработанные;
- 3) пока не достигнут критерий окончания процесса поиска, из необработанных выбираются два изделия (строки, соответствующие этим изделиям помечаются как обработанные)

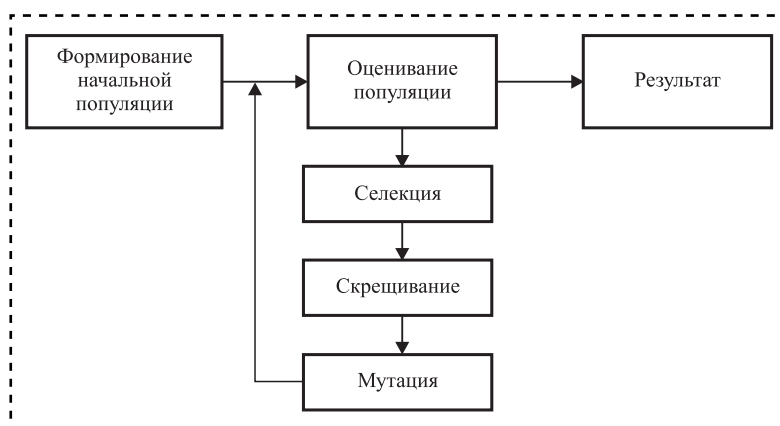


Рис. 2. Типовая схема работы генетического алгоритма

и проводится обмен частями (детальями) двух выбранных изделий с некоторой заданной вероятностью. Вычисляются размеры вновь полученных деталей в целях проверки возможности обмена. Если обмен признан целесообразным, то вносятся изменения в массив с учетом обмена, в противном случае обмен отклоняется. Когда все строки обработаны (получено очередное решение), происходит переход к п. 2.

Одной из характеристик алгоритма является критерий окончания процесса получения нового решения. В зависимости от выбранного критерия строят различные имитационные модели процесса. Критерий окончания процесса подбора влияет на скорость работы алгоритма. Критерием окончания перебора может быть одно из трех событий:

- 1) сформировано заданное пользователем число итераций (перебранных вариантов решения);
- 2) полученное решение достигло заданного пользователем качества (например, разброс замыкающего звена стал меньше заданного порогового значения);
- 3) достигнут некоторый уровень сходимости (улучшение происходит медленно или невозможно).

Еще одна характеристика алгоритма — процедура выбора изделий для обмена деталями: случайный выбор, инбридинг или аутбридинг. Инбридинг предполагает выбор первого изделия пары случайным образом, а второе изделие — ближайшее к первому (в смысле минимального евклидова расстояния между вещественными векторами). При аутбридинге также используют понятие схожести, но пары формируют из максимально далеких изделий.

Для определения схожести изделий можно использовать размер замыкающего звена: наиболее удаленными будем считать изделия, имеющие наибольший и наименьший размер.

Основными факторами, определяющими эффективность применения алгоритма для решения конкретной задачи, является скорость и точность полученного решения. Скорость алгоритма — число итераций (число перебранных вариантов), выполненных при поиске оптимального решения. Точность решения — это степень близости полученного решения к эталону.

Для исследования характеристик алгоритма частичного случайного перебора:

— генерировали соответствующие массивы данных, имеющие случайный разброс и заданное среднее значение размеров деталей, которые имитировали составляющие звенья рассматриваемой размерной цепи;

— закон распределения размеров деталей — нормальный. Параметры распределения размеров деталей — среднее значение равно 1, стандартное отклонение  $\sigma = 0,3$ ;

— статистическую обработку проводили по результатам 1000 экспериментов;

— для сравнения аналогичные исследования проводили также для алгоритма с сорти-

ровкой [2], алгоритма со случайным выбором и алгоритма полного перебора.

В табл. 1 приведены данные, характеризующие эффективность применения описанных алгоритмов для решения задачи индивидуального подбора деталей при сборке.

Результаты сопоставления показателей качества алгоритмов полного перебора и частичного случайного перебора показаны в табл. 2. Варьировали число звеньев  $n$ .

Зависимость трудоемкости процесса подбора от критерия окончания поиска решения для алгоритма частичного случайного перебора и точности полученного решения от оператора отбора пар для скрещивания представлены на рис. 3.

Таблица 1

Поля рассеяния размеров замыкающего звена по результатам компьютерного моделирования

Номер эксперимента	Число звеньев	Объем выборки	Поле рассеяния		
			Алгоритм со случайным выбором	Алгоритм с сортировкой	Алгоритм с частичным перебором
1	2	50	1,70	0,46	0,46
2	3		2,53	0,89	0,07
3	4		2,95	0,39	0,03
4	5		3,22	1,16	0,03
5	2	25	1,67	0,28	0,28
6	3		1,84	0,61	0,09
7	4		1,71	0,22	0,06
8	5		2,06	1,17	0,07
9	2	10	1,27	0,60	0,60
10	3		1,47	0,37	0,15
11	4		1,26	0,26	0,17
12	5		1,41	1,05	0,15
13	2	5	1,27	0,71	0,71
14	3		0,96	0,40	0,38
15	4		1,26	0,21	0,20
16	5		1,09	1,08	0,45

Таблица 2

Показатели качества алгоритмов с полным и частичным перебором по результатам компьютерного эксперимента

Номер эксперимента	$n$	Число вариантов при переборе		Поле рассеяния размеров замыкающего звена	
		Алгоритм полного перебора	Алгоритм частичного перебора	Алгоритм с частичным перебором	Алгоритм с полным перебором
1	3	14400	≈500	0,39	0,39
2	4	1728000	≈1000	0,16	0,07
3	5	207360000	≈3000	0,09	0,03
4	6	24883200000	≈3000	0,06	0,02
5	7	2985984000000	≈3000	0,05	0,02

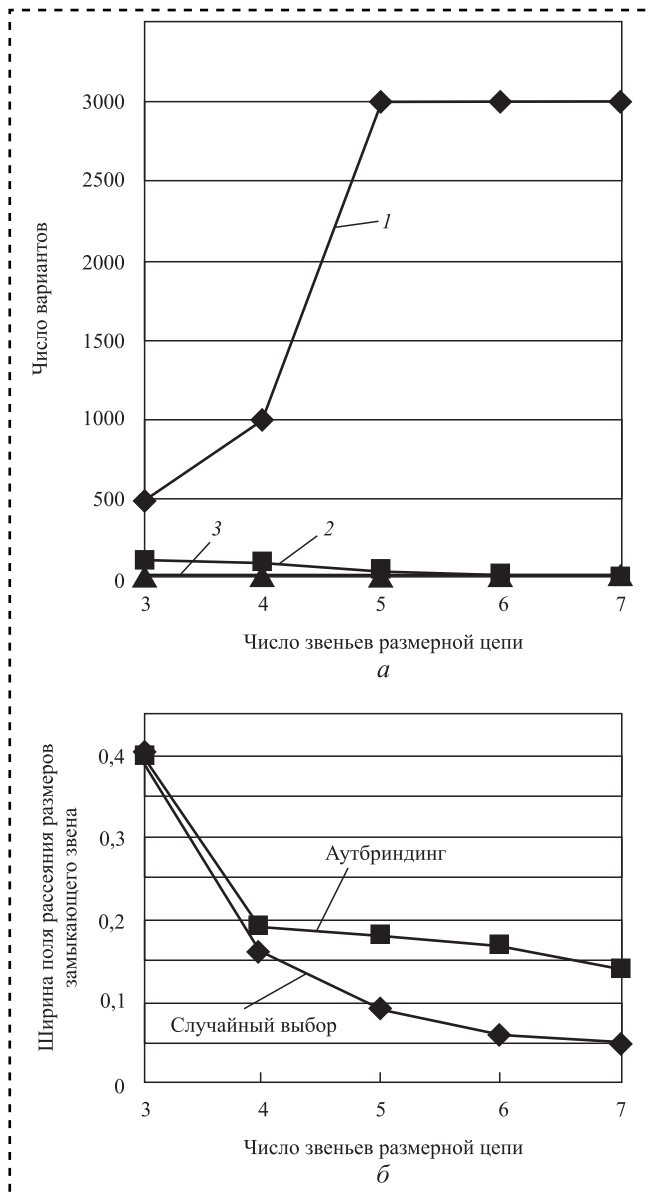
## Выводы

Алгоритм со случайным выбором является эффективным и позволяет таким образом подобрать собираемые детали, что они практически полностью взаимно компенсируют погрешности изготовления друг друга.

Технология виртуальной сборки при использовании алгоритма со случайным выбором позволяет использовать наиболее существенное преимущество метода индивидуального подбора деталей — возможность достижения высокого качества сборки из деталей обычного качества при приемлемой трудоемкости процесса подбора.

## Библиографический список

1. **The home of the L-series:** We tour Canon's Utsunomiya factory // Home [Electronic resource]. Access mode: <https://www.dpreview.com/articles/4996495413/the-home-of-the-l-series-we-tour-canon-utsunomiya-factory>.
2. **Безъязычный В.Ф., Непомилуев В.В., Семенов А.Н.** Обеспечение качества изделий при сборке. М.: Издательский дом "Спектр", 2012. 204 с.
3. **Задорина Н.А.** Разработка модели процесса индивидуального подбора деталей с использованием методов стохастической оптимизации // Сб. науч. тр. 5-й Междунар. молодежной науч.-практ. конф. "Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование". Т. 1. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Университетская книга, 2018. С. 213—217.
4. **Задорина Н.А., Непомилуев В.В.** Исследование влияния критерия окончания итерационного процесса подбора деталей на качество сборки изделий // Сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. "Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем". Т. 1. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Университетская книга, 2019. С. 284—288.



**Рис. 3. Зависимости трудоемкости алгоритма от критерия окончания (а) и влияние оператора отбора пар на точность решения (б):**

1 — число перебранных решений превысило 3000 или получено подряд пять "неподходящих" решений; 2 — разброс замыкающего звена стал меньше заданного пользователем порогового значения; 3 — замыкающее звено хотя бы одной цепи стало меньше заданного пользователем порогового значения

# ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.7.014.2

DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-3-158-160

**А.В. Щедрин**, канд. техн. наук, **В.Ф. Алешин**, канд. техн. наук, **И.Ю. Игнаткин**, д-р техн. наук,  
**А.М. Бугаев**, канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
**Н.Ю. Чихачёва** (Академия проблем качества, СОШ № 1, г. Покров)  
E-mail: ignatkinivan@gmail.com

## Технологические машины трения для синтеза смазочных материалов, используемых при механической и комбинированной обработке

*Представлены конструкция и возможности технологических машин трения для системного синтеза инновационных смазочных материалов для механической и комбинированной обработки дорнованием, волочением, редуцированием и резанием.*

*The design and capabilities of technological friction machines for the systemic synthesis of innovative lubricants in the methods of mechanical and combined processing by durning, drawing, reduction and cutting are presented.*

**Ключевые слова:** технологическая машина трения, смазывающе-охлаждающая технологическая среда.

**Keywords:** technological friction machine, lubricating-cooling technological medium.

Как показывает системный структурно-параметрический анализ методов механической и комбинированной обработки — смазывающе-охлаждающая технологическая среда (СОТС), а также технология ее применения являются значимым элементом способа воздействия на обрабатываемый материал заготовки детали [1–3].

Для системного синтеза инновационных смазочных материалов в методах механической и комбинированной обработки разработаны конструкции и исследованы возможности технологических машин трения, реализующих волочение, дорнование, редуцирование и резание.

На рис. 1 на стр. 2 обложки представлена технологическая машина трения для реализации методов волочения сплошных [4] и полых заготовок типа "труба" на вертикальном гидравлическом прессе.

Данная технологическая машина трения (рис. 1, б) включает опорную плиту 1; обойму 2, по трем отверстиям которой перемещаются штанги 3, связанные верхним 4 и нижним фланцами 5. На шаровой опоре 6 установлена деформирующая фильера 7, воздействующие поверхности рабочего канала которой упрочнены регулярным микрорельефом [4–6]. Тяговое устройство данной машины трения состоит из

двух полумуфт 8, связанных разрезными пружинными кольцами 9. Конструкция и внешний вид образцов-заготовок для волочения сплошных профилей представлены в работе [4].

Первый вариант схемы оправочного волочения полых (трубных) образцов-заготовок включает их единое изготовление с полым участком 10 и резьбовым участком под резьбу М16 для захвата тяговым устройством машины трения. Перед волочением в отверстие полого участка — имитатора трубной заготовки — помещают с зазором оправку 11, упрочненную регулярным микрорельефом 12 и покрытую, например, металлолакирующей смазкой [3, 12]. После обжатия полого участка образца-заготовки 10 через фильеру 7 оправка 11 распрессовывается с помощью вилочного упора (не показан), установленного в инструментальную полость обоймы 2 вместо фильеры 7. При этом динамометрическая система фиксирует силу распрессовки или извлечения оправки 11 из образца-заготовки 10.

Второй вариант экспериментальной схемы оправочного волочения трубной заготовки включает применение оправки 13, рабочая часть которой упрочнена аналогичным регулярным микрорельефом 12. Трубный образец-

заготовку 14 фиксируют гайкой 15. После обжатия заготовки 14 через фильеру 7, гайку 15 свинчивают, а заготовку 14 выпрессовывают с оправки 13 аналогично предыдущему варианту с помощью кольцевого вилочного упора.

Кроме кольцевых деформирующих фильер 7 [4, 5] в качестве обрабатывающего инструмента на данной машине трения можно использовать фильеру со сферическими деформирующими элементами и режущую (скальпирующую) фильеру (рис. 2 на стр. 2 обложки). Фильера со сферическими деформирующими элементами (рис. 2, а) позволяет создавать значительные контактные давления, а режущая (скальпирующая) фильера (рис. 2, б) реализует режущее воздействие на обрабатываемый материал в условиях применения исследуемых СОТС [7–10].

Конструкция технологической машины трения для исследования процессов дорнования в условиях действующего и отсутствующего противодействия СОТС (рис. 3) включает обойму 1 со смазочной полостью 2, дорн-прошивку, состоящую из оправки 3, деформирующего элемента 4 и передней направляющей 5. Обрабатываемый образец-заготовка 6 центрируется с помощью крышки 7. При размещении в смазочной полости 2 определенного объема исследуемой СОТС при перемещении дорн-прошивки сокращается объем полости 2 и смазка с противодействием истекает через контактную зону заготовки 6 и деформирующего элемента дорн-прошивки [11, 14].

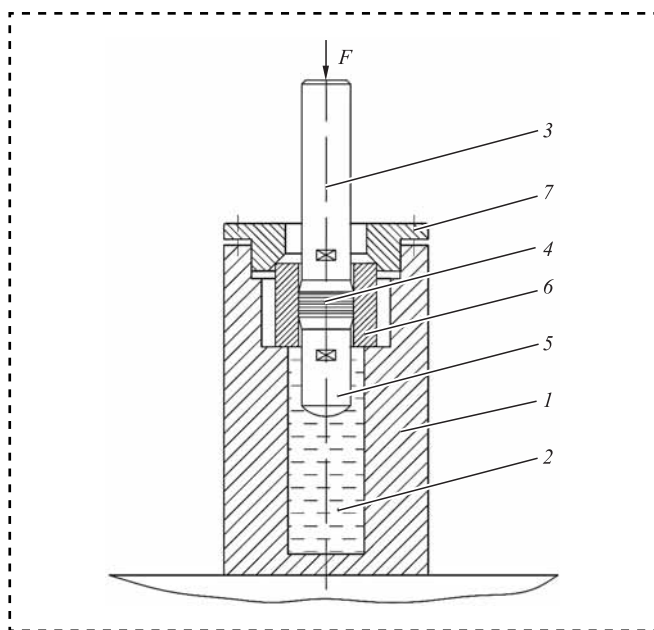


Рис. 3. Технологическая машина трения для реализации методов дорнования отверстий в условиях действующего и отсутствующего противодействия СОТС

Данная технологическая машина трения позволяет обрабатывать рецептуру СОТС без ее противодействия — в этом случае исследуемая СОТС наносится предварительно на поверхности инструмента и отверстия образца-заготовки [12, 13, 15].

На рис. 4 на стр. 2 обложки представлены экспериментальные инструменты в виде дорнов-прошивок для синтеза оптимальной рецептуры СОТС при дорновании отверстий в условиях действующего и отсутствующего противодействия смазки [16, 17].

Конструкция технологической машины трения для реализации метода редуцирования в условиях действующего и отсутствующего противодействия исследуемой СОТС содержит обойму 1 со смазочной полостью 2 (рис. 5) [18, 19]. В обойме установлена деформирующая фильера 3, рабочий канал которой имеет регулярный микрорельеф поверхности (не показан) [4–6]. Редуцируемая образец-заготовка 4 проталкивается через рабочий канал фильеры 3. При наличии в полости 2 заданного объема исследуемой СОТС за счет сокращения объема реализуется охватывающее поверхностно-пластическое деформирование с противодействием СОТС.

На данной машине трения помимо деформирующих кольцевых фильер (см. рис. 1, б) [4–6] можно применять фильеры со сферическими деформирующими элементами (см. рис. 2, а) и режущие фильеры (см. рис. 2, б), а также комбинированные деформирующе-режущие инструменты [10].

На рис. 6 на стр. 2 обложки представлен токарный резец с развитой регулярной микрогеометрией передней поверхности рабочей части [Патент 2261781 РФ]. Резец имеет боковой патрубок для

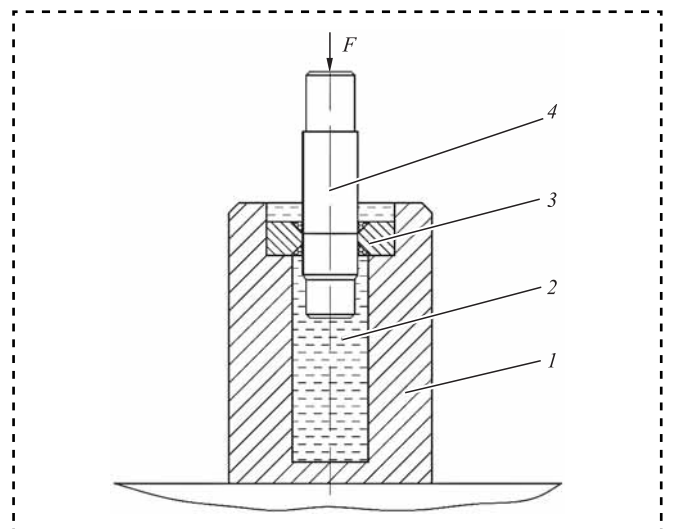


Рис. 5. Технологическая машина трения для реализации метода охватывающей обработки редуцированием

принудительной подачи исследуемой СОТС, которая по глубоким канавкам регулярной микрогеометрии передней поверхности надежно поступает в контактную зону со сходящей стружкой.

Для исследования возможностей снижения износа тестируемой СОТС по всем поверхностям рабочей части резца, регулярный микро рельеф электроэрозионным методом выполняется на задних поверхностях [1, 2].

Самоосциллирующий шлифовальный круг реализует схему прерывистого контакта с обрабатываемым образцом-заготовкой в методе плоского шлифования (рис. 7 на стр. 2 обложки).

Представленные конструкции инструментов позволяют комплексно проанализировать структуру и трибологические свойства исследуемых СОТС для лезвийной и абразивной обработки резанием, а также синтезировать оптимально эффективную технологию их применения [1, 2].

На основе выполненных разработок и исследований синтезированы высокоэффективные металлоплакирующие смазки, комплексно реализующие фундаментальное научное открытие "Эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского". Существенно расширена информационная база алгоритмических процедур инновационных направлений в области трения, износа и технологии машиностроения — "трибология на основе самоорганизации" и "искусственный технологический интеллект" [1—3, 20, 21]. Дополнительно полученные практические результаты защищены патентами РФ на изобретения 2063861, 2277579, 2380201, 2475348, 2560475, 2560477, 2593062, 2647057.

### Библиографический список

1. Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю. Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.
2. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
3. Трибология на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов и др. Германия: LAMBERT, 2015. 245 с.
4. Гаврилов С.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 33—39.
5. Исследование комбинированного волочения инструментом с регулярным микро рельефом / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2008. № 4. С. 78—80.
6. Теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2. С. 11—17.

7. Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 21—25.

8. Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном деформировании / А.В. Щедрин и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3—7.

9. Инновационные способы воздействия на обрабатываемый материал в методах охватывающей обработки длинномерных заготовок волочением / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 10. С. 467—470.

10. Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Сергеев Е.С. Исследование технологических возможностей комбинированного инструмента для охватывающей обработки с параллельным сочетанием резания и деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 5. С. 40—44.

11. Совершенствование технологии применения смазывающе-охлаждающих технологических сред в комбинированных методах обработки проката / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2006. № 10. С. 51—52.

12. Повышение эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхностей рабочих элементов инструмента / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 6. С. 14—19.

13. Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А. Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76—79.

14. Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 30—35.

15. Влияние угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 20—24.

16. Комплексное исследование комбинированной прошивки отверстий с противодавлением технологической смазки / А.В. Щедрин и др. // Технология машиностроения. 2009. № 9. С. 17—20.

17. Технологические возможности метода комбинированного дорнования отверстий инструментами с винтовой геометрии воздействующих поверхностей / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 8. С. 342—347.

18. Щедрин А.В., Козлов А.Ю. Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8—12.

19. Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования заготовок из алюминиевых сплавов / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 7. С. 291—296.

20. Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 6. С. 18—25.

21. Щедрин А.В., Кострюков А.А. Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования процессов холодного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 11. С. 495—499.





**Б.М. Эрлих**, канд. техн. наук (ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова)

E-mail: uliaerlich@mail.ru

## Задача активного воздействия на вынужденные колебания машин и механизмов с учетом нелинейностей пассивных сил

*Рассмотрена актуальная задача активного воздействия на вынужденные колебания машин и механизмов с учетом пассивных нелинейностей упругих и диссипативных сил. Эта задача описывается дифференциальным уравнением, в котором присутствует функция пассивной нелинейности, позволяющая использовать как некоторые известные варианты нелинейностей, так и аппроксимировать другие возможные их варианты. В качестве активного воздействия для гашения или возбуждения колебаний используется силовое воздействие. Проведенное исследование параметров функции пассивной нелинейности позволяет упростить этап аппроксимации этой функции при решении реальных задач.*

*The actual problem of actively influencing forced vibrations of machines and mechanisms with an array passive nonlinearities of elastic and dissipative forces is considered. This problem is described by a differential equation in which the passive nonlinearity function is used, allowing it possible to use both certain known nonlinearities and approximate other possible variants thereof. As an active damping or excitation of oscillations a force impact is used. The study of the parameters of the passive nonlinearity function carried out allows us to simplify the stage of approximation of this function in solving real problems.*

**Ключевые слова:** активное воздействие, пассивные нелинейности, упругие и диссипативные силы, вынужденные колебания, гашение или возбуждение колебаний, параметры функции нелинейного звена машин и механизмов, эффективность решения задачи, теория оптимального управления.

**Keywords:** active impact, passive nonlinearities, elastic and dissipative forces, forced vibrations, quenching or excitation of oscillations, parameters of the function of a nonlinear link of machines and mechanisms, problem solving efficiency, optimal control theory.

Проведено исследование влияния параметров функции пассивной нелинейности упругих и диссипативных сил в задаче синтеза систем гашения и возбуждения автоколебаний машин и механизмов [1–4].

Уравнение динамики для таких систем имеет общий вид:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + f(x, \dot{x}) = u(x, \dot{x}), \quad (1)$$

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

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

$u(x, \dot{x})$  — закон силового воздействия с частотой  $\omega$ .

Функция  $f(x, \dot{x})$  разбита на две: отдельно упругую нелинейную часть  $f_1(x)$ , отдельно диссипативную линейную и нелинейную части  $f_2(\dot{x})$ :

$$f(x, \dot{x}) = f_1(x) + f_2(\dot{x}). \quad (2)$$

Для исследования влияния параметров в аппроксимируемые функции  $f_1(x)$ ,  $f_2(\dot{x})$  добавлены дополнительные члены четвертой степени  $x$ ,  $\dot{x}$ , т.е.:

$$f_1(x) = -n_1 \operatorname{sign}(x) + n_2 x \operatorname{abs}(x) + n_3 x^3 + n_4 x^4; \quad (3)$$

$$f_2(\dot{x}) = 2\mu \dot{x} - k_1 \operatorname{sign}(\dot{x}) + k_2 \dot{x} \operatorname{abs}(\dot{x}) + k_3 \dot{x}^3 + n_4 x^4, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4$  — коэффициенты аппроксимации упругой нелинейности;

$k_1, k_2, k_3, k_4$  — коэффициенты аппроксимации диссипативной нелинейности;

$\mu$  — коэффициент линейной диссипативной части.

Функции  $f_1(x)$ ,  $f_2(\dot{x})$  из выражений (3, 4) аппроксимируют довольно широкий спектр вариантов функции  $f(x, \dot{x})$ , что позволяет в реальных задачах определять параметры аппроксимации  $n_1, n_2, n_3, n_4, \mu, k_1, k_2, k_3, k_4$ .

Структура закона силового воздействия определена с помощью методов гармонической линеаризации и оптимального управления:

$$u(x, \dot{x}) = (\omega_0^2 - \omega^2 + f_{1g}(A))x + f_{2g}(A)\dot{x}/\omega, \quad (5)$$

где  $f_{1g}(A)$ ,  $f_{2g}(A)$  — функции гармонической линеаризации соответственно нелинейностей  $f_1(x)$ ,  $f_2(\dot{x})$ , которые рассчитывают по формулам:

$$f_{1g}(A) = -\frac{4n_1}{\pi A} + \frac{8n_2}{3\pi}A + \frac{3n_3}{4}A^2 + \frac{32n_4}{15\pi}A^3; \quad (6)$$

$$f_{2g}(A) = 2\mu\omega - \frac{4k_1}{\pi A} + \frac{8k_2}{3\pi}\omega^2 A + \frac{3k_3}{4}\omega^3 A^2 + \frac{32k_4}{15\pi}\omega^4 A^3, \quad (7)$$

где  $A$  — единственный дополнительный параметр, требующий определения размерности амплитуды;  $\omega$  — частота силового воздействия (в общем случае  $\omega \neq \omega_0$ ).

Для определения параметра  $A^*$ , с которого необходимо начинать поиск оптимального ре-

шения задачи гашения и возбуждения колебаний, решим задачу определения минимума:

$$A^* = \min_A (f_{1g}(A))^2 + (f_{2g}(A))^2; \quad \omega_0 = \omega. \quad (8)$$

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

Таким образом, поиск оптимального решения задачи гашения и возбуждения колебаний сводится к решению дифференциального уравнения системы (1)–(8).

Так как для широкого класса характеристик вынужденных колебаний  $f_{1g}(A) = 0$ , то для проведения исследования влияния параметров функции пассивной нелинейности принято  $n_1 = 0$ ;  $n_2 = 0$ ;  $n_3 = 0$ ;  $n_4 = 0$ ;  $\omega_0 = 1,0$ ;  $\omega = 1,0$ .

На рис. 1 приведены графики функции диссипативной нелинейности  $f_2(\dot{x})$  для некоторых вариантов нелинейностей систем с сухим трением, с квадратично линейным трением, с характеристикой Рэля, с характеристикой типа Ван дер

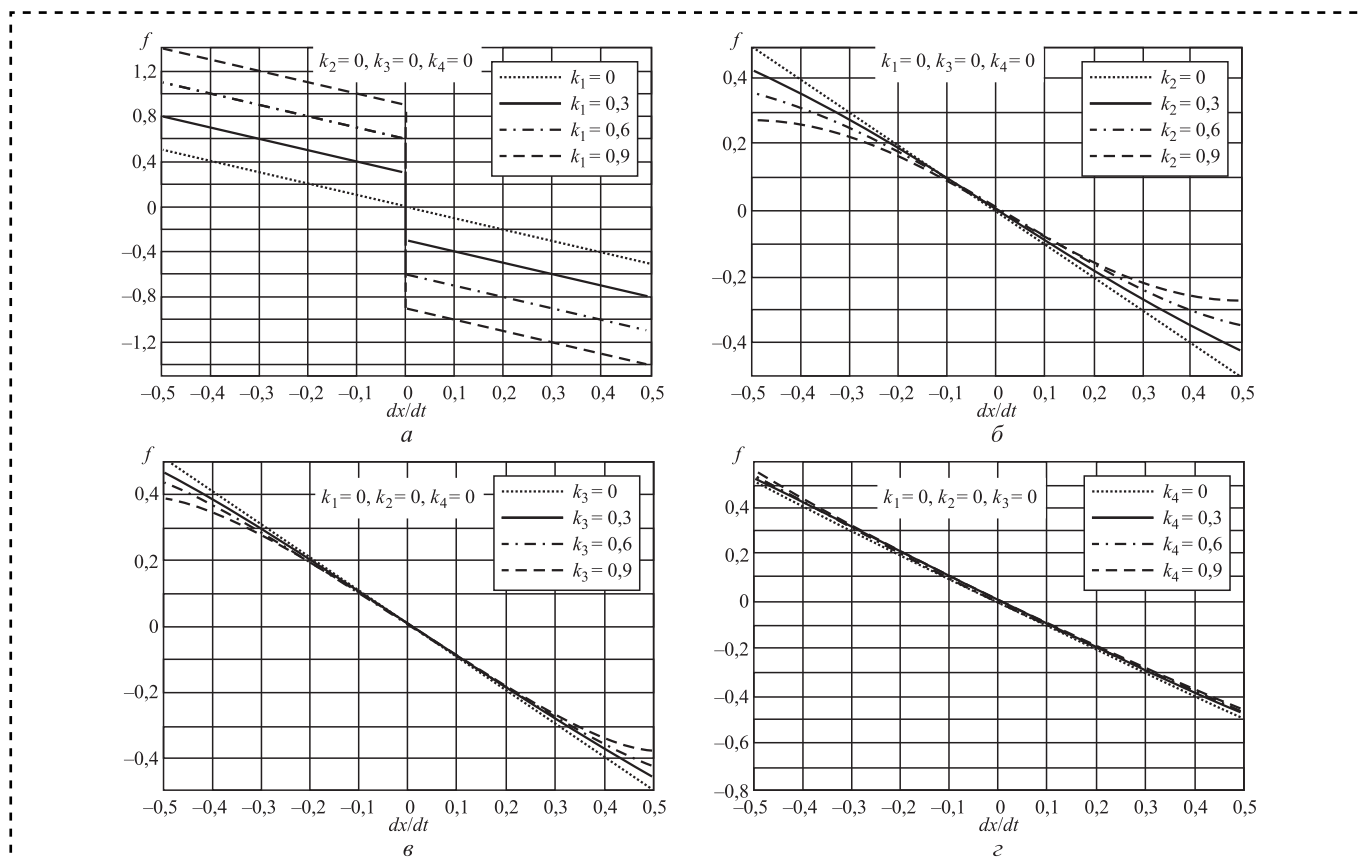


Рис. 1. Графики функции диссипативной нелинейности звена  $f_2(\dot{x})$  для некоторых вариантов нелинейностей при наличии линейной части диссипативного звена ( $\mu = -0,5$ ):

$a$  — сухое трение;  $b$  — квадратично-линейное трение;  $v$  — характеристика Рэля;  $z$  — характеристика типа Ван дер Поля



Поля. Значение функции  $f_2$  при увеличении производной ( $\dot{x}$ ) в диапазоне  $[-0,5, 0,5]$  постоянно уменьшается. Также заметно уменьшение процента изменения функции нелинейного звена  $f_2(\dot{x})$  от степени производной  $\dot{x}$  от 0 до 4 (от  $k_1$  до  $k_4$ ).

На рис. 2 показаны графики функции диссипативной нелинейности  $f_2(\dot{x})$  произвольной структуры ( $k_1, k_2, k_3, k_4$  — любые константы в диапазоне  $(0; 0,9)$ ). Наличие скачков в точке  $\dot{x} = 0$  связано с условием  $k_1 \neq 0$  (сухое трение).

В связи с принятым допущением  $f_{1g}(A) = 0$  условие (8) для определения дополнительного параметра  $A^*$ , с которого необходимо начинать поиск оптимального решения задачи гашения и возбуждения колебаний, превращается в условие отсутствия силового воздействия  $u(x, \dot{x}) = 0$ :

$$f_{2g}(A) = 0; \omega_0 = \omega. \quad (9)$$

В качестве критериев оптимальности используем два: максимальную фактическую амплитуду колебаний и интегральную интенсивность силового воздействия. Для расчета интегральной интенсивности воздействия за время  $T$  используем формулу:

$$Iu = \int_0^T (u(x, \dot{x}))^2 dt. \quad (10)$$

На основании выражений (9), (10) можно сделать вывод, что во всех точках  $A^*$  отсутствует силовое воздействие  $u = 0$  и  $Iu = 0$ .

На всех последующих рисунках основные параметры функции пассивной нелинейности, кроме ранее указанных, приняты следующие:  $k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1$ , причем возможно варьирование любого из них при фиксировании остальных.

На рис. 3 показаны графики для проведения выбора дополнительного параметра  $A^*$  при различных значениях коэффициента линейной диссипативной части ( $\mu = -0,5; -0,25; -0,75$ ).

В основном варианте параметров  $\mu = -0,5; k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1$ , дополнительный параметр  $A^* \approx 1,5$ .

На рис. 4 и 5 представлены итоговые зависимости фактических значений максимальной амплитуды колебаний  $A_f$  и интегральной интенсивности  $Iu$  в широком диапазоне изменения параметра  $A$  с использованием силового

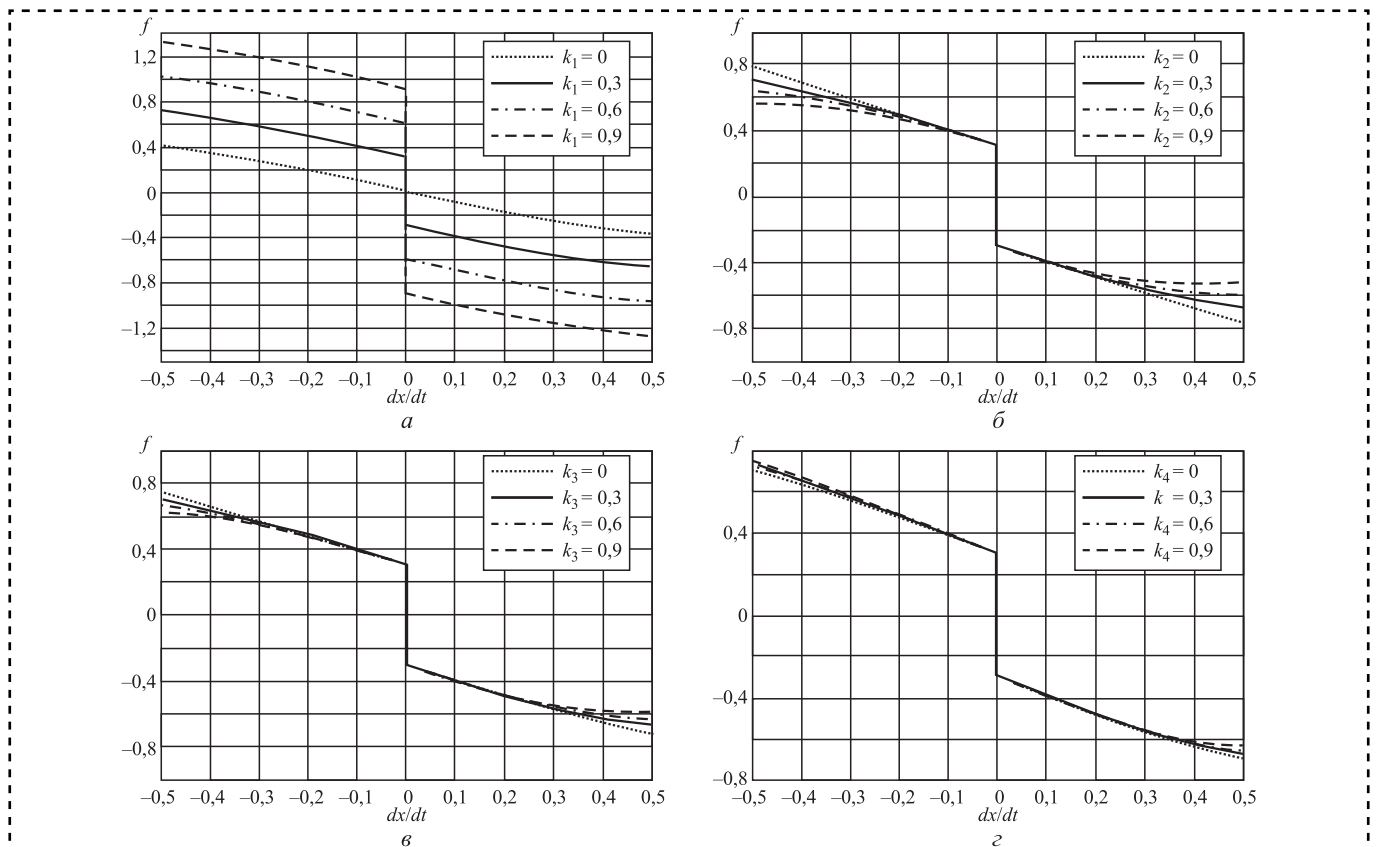
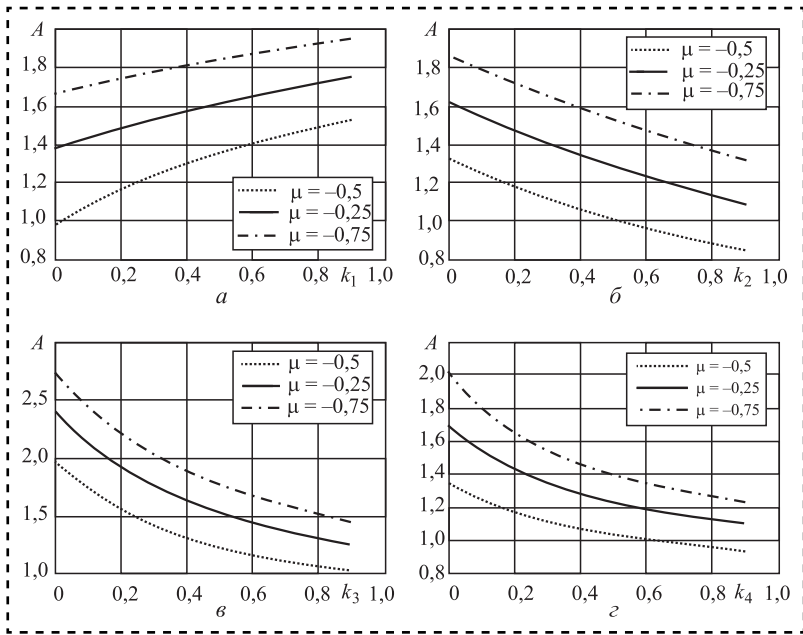


Рис. 2. Графики функции нелинейности  $f_2(\dot{x})$  при изменении только одного из коэффициентов  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) и фиксации значений остальных коэффициентов ( $\mu = -0,5$ ):  
 а —  $k_2 = k_3 = k_4 = 0,3$ ; б —  $k_1 = k_3 = k_4 = 0,3$ ; в —  $k_1 = k_2 = k_4 = 0,3$ ; г —  $k_1 = k_2 = k_3 = 0,3$

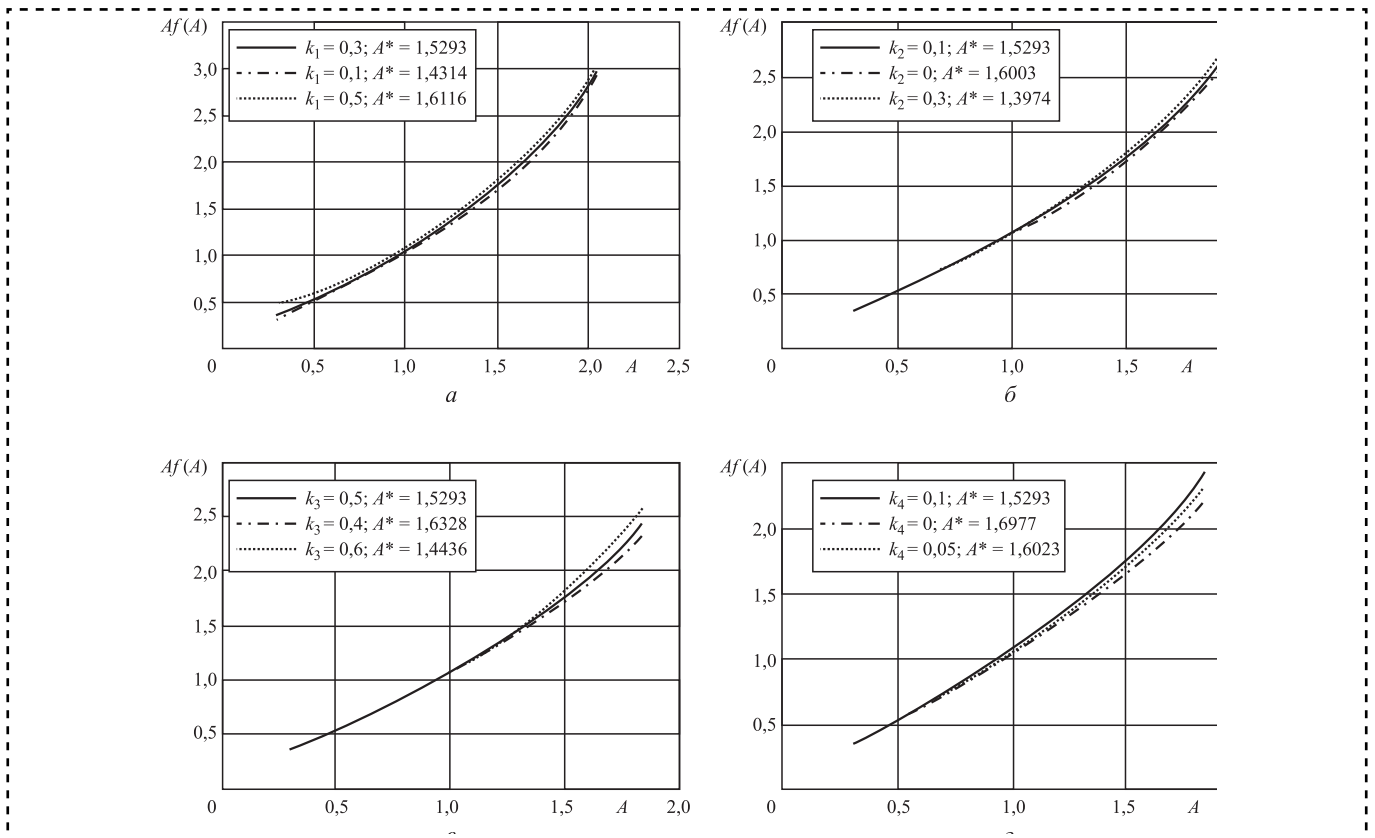


**Рис. 3.** Графики для выбора дополнительного параметра  $A^*$  при варьировании только одного из коэффициентов  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) и фиксации значений остальных коэффициентов ( $\omega_0 = 1; \omega = 1$ ):  
 а —  $k_2 = 0,1; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1$ ; б —  $k_1 = 0,3; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1$ ;  
 в —  $k_1 = 0,5; k_2 = 0,1; k_4 = 0,1$ ; з —  $k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_3 = 0,5$

воздействия. На каждом из рисунков представлены четыре графика, в каждом из которых варьируется только один из параметров  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) при фиксации значений остальных. Фактические значения  $Af, Iu$  получены путем многократного решения дифференциального уравнения системы (1)–(10) за время  $T = 50$ .

Анализ рис. 4, 5 показывает, что точка нулевой интегральной интенсивности лежит в диапазоне  $A^*[1,5–1,6]$ . Слева от этой точки  $A^*$  идет гашение колебаний с уменьшением амплитуды  $Af$  в 5–6 раз. Справа от точки  $A^*$  идет возбуждение колебаний (примерно в 1,5 раза). Расхождение значений амплитуды  $Af$  заметно при малых значениях дополнительного параметра  $A < 0,5$  для параметра  $k_1$  и при  $A > 1,5$  для остальных параметров  $k_i$ .

При гашении колебаний уменьшение максимальной фактической амплитуды



**Рис. 4.** Графики максимальной фактической амплитуды колебаний  $Af$  в диапазоне изменения дополнительного параметра  $A [0,3–2,0]$  при варьировании трех значений параметра каждого из  $k_i$  и фиксации остальных ( $\omega_0 = 1; \mu = -0,5; \omega = 1$ ):  
 а —  $k_2 = 0,1; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1$ ; б —  $k_1 = 0,3; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1$ ; в —  $k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_4 = 0,1$ ; з —  $k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_3 = 0,5$

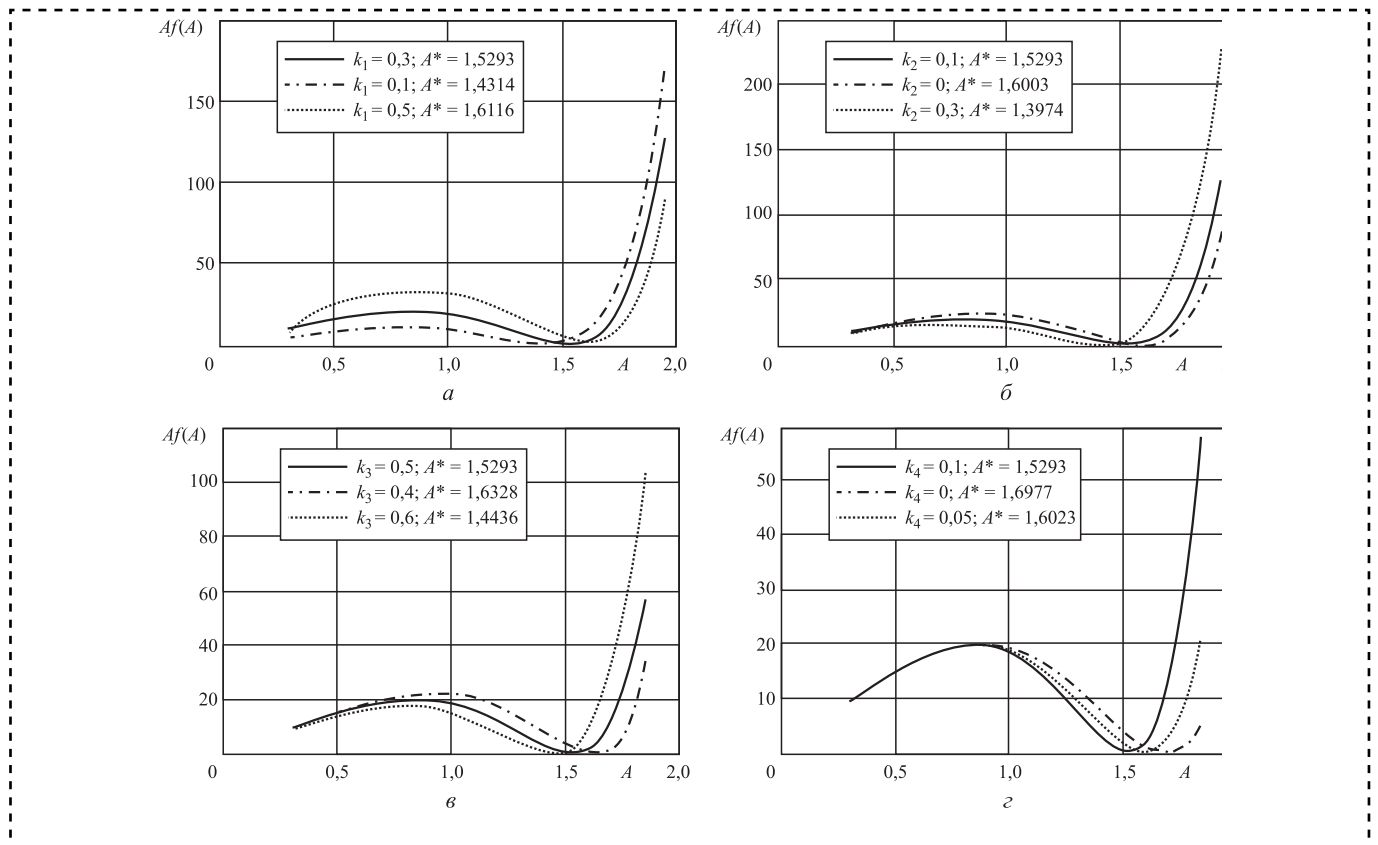


Рис. 5. Графики интегральной интенсивности  $Iu$  в диапазоне изменения дополнительного параметра  $A$  [0,3–2,0] при варьировании трех значений параметра каждого из  $k_i$  и фиксации остальных ( $\omega_0 = 1; \mu = -0,5; \omega = 1$ ):

$a - k_2 = 0,1; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1; б - k_1 = 0,3; k_3 = 0,5; k_4 = 0,1; в - k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_4 = 0,1; з - k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_3 = 0,5$

происходит до некоторой точки  $A \approx 1,0$  с естественным ростом интегральной интенсивности, а далее при условии  $A < 1,0$  в связи со значительным уменьшением амплитуды  $Af$  наблюдается ее падение. При возбуждении колебаний от точки  $A^*$  наблюдается заметный рост интегральной интенсивности.

Проведенные расчеты показали, что при варьировании в широком диапазоне параметров функции пассивной нелинейности, итоговые зависимости фактических значений максимальной амплитуды колебаний  $Af$  существенно не меняются. Более заметно при этом изменение интегральной интенсивности силового воздействия  $Iu$ .

### Вывод

Метод решения задачи активного воздействия на вынужденные колебания машин и механизмов позволяет изменять состояние автоколебаний (гашение или возбуждение) машин и механизмов с использованием силового воздействия. Проведенные исследования параметров сложного типа функции пассивной нелинейности позволяют упростить этап

аппроксимации этой функции при решении реальных задач. В качестве критериев оптимальности использованы максимальная фактическая амплитуда колебаний и интегральная интенсивность силового воздействия.

Приведенные результаты расчетов подтверждают работоспособность предлагаемого метода решения поставленной задачи.

### Библиографический список

1. Израйлович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Спутник, 2015. 38 с.
2. Эрлих Б.М. Применение общей процедуры параметрического и силового гашения фрикционных колебаний в системах с нелинейными силами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 8. С. 360–366.
3. Эрлих Б.М. Методика активного гашения и возбуждения колебаний в машинах и механизмах // Международная конф. "Машины, технологии и материалы для современного машиностроения". М.: ИМАШ РАН, 2018.
4. Эрлих Б.М. Методология демпфирования и возбуждения колебаний машин и механизмов с упругими и диссипативными типами нелинейностей произвольной структуры // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. Т. 20. № 7. С. 325–329.

**В.П. Лапшин, В.В. Христофорова, канд-ты техн. наук, Е.В. Халина**  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: [katya-live697@yandex.ru](mailto:katya-live697@yandex.ru), [lapshin1917@yandex.ru](mailto:lapshin1917@yandex.ru)

## Моделирование динамики вибрационных движений индентора при выполнении операции выглаживания с учетом влияния термодинамической подсистемы

*Рассмотрены вопросы, связанные с математическим описанием и численным моделированием вибраций индентора при выполнении операций выглаживания в металлообработке. Уделено внимание оценке влияния температуры, выделяемой при обработке на динамику деформационных движений инструмента. Выявлено, что благодаря термодинамике процесса обработки деформационные движения инструмента стабилизируются, хотя и носят сложный, с точки зрения пространства состояния, характер.*

*Issues related to the mathematical description and numerical modeling of indenter vibrations in the performance of smoothing operations in metal working are considered. Attention is paid to assessment the influence of the temperature released during processing on the dynamics of deformation movements of the tool. It was revealed that due to the thermodynamics of the processing, the deformation movements of the tool are stabilized, although they are complex in terms of the state space.*

**Ключевые слова:** пространство состояний, математическая модель, индентор, термодинамика выглаживания.

**Keywords:** state space, mathematical model, indenter, smoothing thermodynamics.

### Введение

Операция выглаживания — одно из итоговых мероприятий, обеспечивающих заданное высокое качество поверхностей металлических деталей, изготовленных на металлорежущих станках (рис. 1) [1, 2].

В суппорте токарного станка закреплен инструмент, на вершине которого расположен алмазный индентор для выглаживания поверхности обрабатываемой детали в целях обеспечения требуемого качества. Обработку выглаживанием проводят на высоких скоростях вращения шпинделя станка, так как глубина внедрения индентора в обрабатываемую деталь очень мала [3, 4]. Однако несмотря на такие условия обработки, упругая диссипативная система станка (технологическая система СПИД — станок, приспособление, инструмент, деталь) вырабатывает деформационные

колебания индентора, существенным образом влияющих на качество получаемой поверхности. Структура этих колебаний во многом объясняется изначальной шероховатостью рельефа обрабатываемой детали (рис. 2) [5].



Рис. 1. Обработка выглаживанием

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00022.

## Синтез математической модели вибрационного движения инструмента

В начале процедуры синтеза математической модели вибрационного движения индентора рассмотрим визуализированную модель описания основных элементов СПИД в приложении процедуры выглаживания (рис. 3).

Сложный характер колебаний индентора относительно обрабатываемой детали можно разложить вдоль двух основных деформационных осей  $X$  и  $Y$ . С учетом этого, а также по анализу силовой реакции со стороны процесса на формообразующие движения индентора, математическая модель деформационных движений примет вид:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + h_{xx} \frac{d \Delta x}{dt} + h_{xy} \frac{d \Delta y}{dt} + c_{xx} \Delta x + \\ + c_{xy} \Delta y = F_t + F_w; \\ m \frac{d^2 \Delta y}{dt^2} + h_{yy} \frac{d \Delta y}{dt} + h_{yx} \frac{d \Delta x}{dt} + c_{yy} \Delta y + \\ + c_{yx} \Delta x = P; \\ T_\theta \frac{d \theta}{dt} + (\theta + \theta_0) = k_0 M, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  — масса индентора;

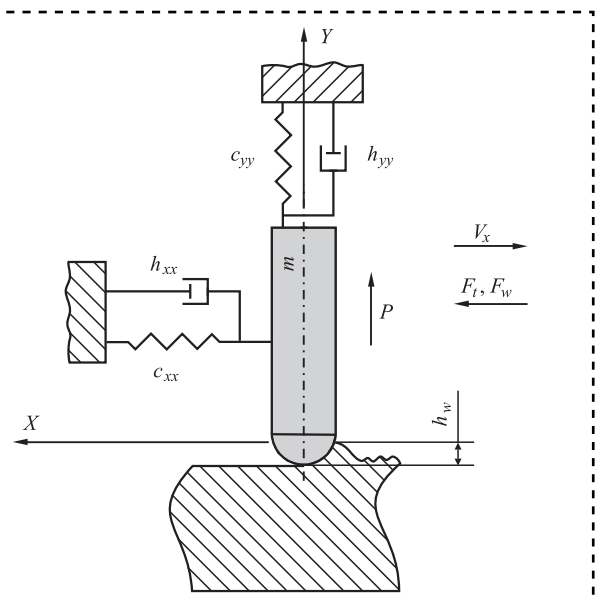


Рис. 3. Схема, поясняющая синтез математической модели

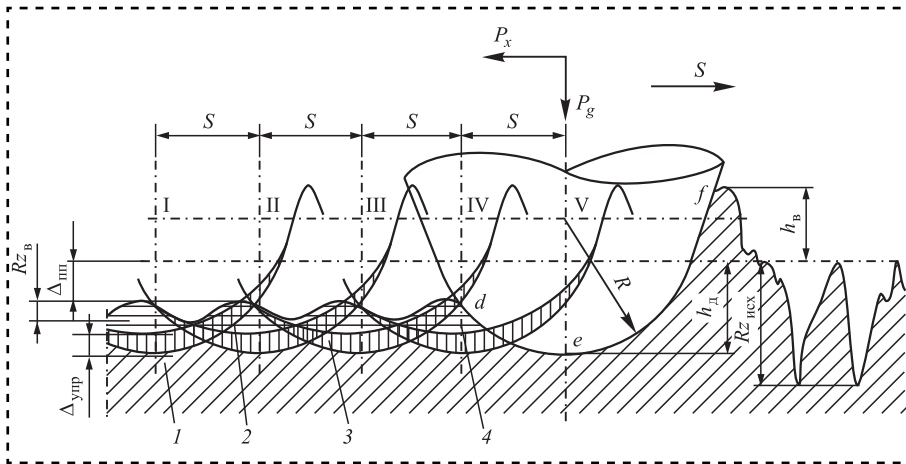


Рис. 2. Процесс выглаживания на каждом обороте детали:

1 — профиль следа положения выглаживателя; 2 — фактический профиль выглаживаемой поверхности; 3 — упругое восстановление поверхности; 4 — пластическое искажение профиля

Образующийся в результате алмазного выглаживания микрорельеф поверхности обусловлен следующими факторами [5]:

- кинематикой процесса (направлением взаимного перемещения инструмента и обрабатываемой детали);
- исходной шероховатостью;
- формой и размером рабочей части алмаза;
- глубиной внедрения алмаза в обрабатываемую поверхность;
- пластическим течением материала, обуславливающим появление вторичной шероховатости;
- шероховатостью рабочей части алмаза;
- величиной упругого восстановления поверхности после выглаживания;
- вибрациями системы СПИД.

Одним из важнейших факторов, влияющих на любой процесс обработки детали на металлорежущих станках, — влияние температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали на динамику возмущенного вибрационного движения инструмента. В работе [6] описан процесс выделения и распространения теплоты в металле обрабатываемой детали, где для стационарного случая выявлен аperiодический характер ее нарастания в зоне контакта. В связи с этим представляет интерес вопрос математического моделирования взаимовлияния процесса выглаживания и процесса выделения теплоты с точки зрения обеспечения динамической устойчивости возмущенного вибрационного движения инструмента.

$h$  — коэффициенты диссипации СПИД;  
 $c$  — коэффициенты, определяющие жесткость реакции СПИД на вибрации индентора;  
 $F_t$  — сила трения, формируемая в контакте задней грани индентора и выглаженной поверхности детали;

$F_w$  — аналог силы резания (сила выглаживания), формируемая на передней грани индентора;

$P$  — нормальная сила, характеризующаяся как сила выталкивания индентора из детали;

$M$  — мощность необратимых преобразований, выделяемая при выглаживании индентором;

$k_\theta$  — коэффициент, отображающий преобразование мощности, выделенной при выглаживании, в теплоту;

$\theta$  — температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали;

$\theta_0$  — температура детали и окружающей среды до момента начала обработки;

$T_\theta$  — постоянная времени, характеризующая инерционность нарастания температуры в зоне контакта по мере осуществления процедуры выглаживания.

Сила трения характеризуется следующим выражением:

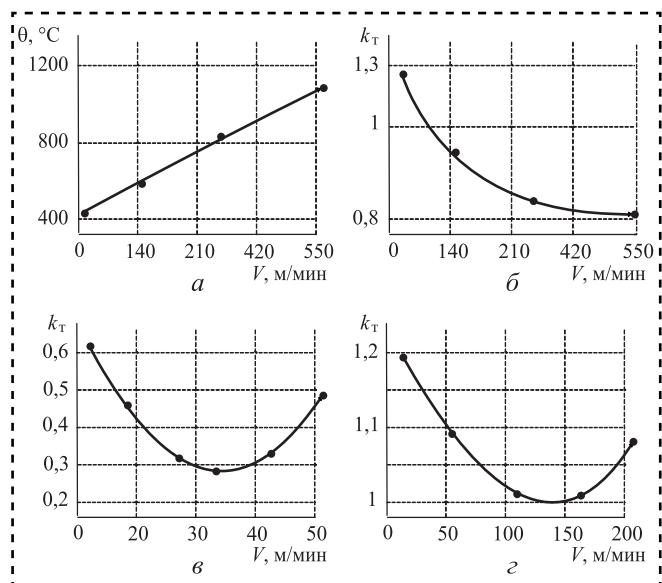
$$F_t = K_t P;$$

$$K_t = \frac{1}{2} (e^{-\alpha_1 \theta} + e^{\alpha_2 \theta}), \quad (2)$$

где  $K_t$  — коэффициент трения, функционально зависящий от температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали.

Коэффициент трения имеет ярко выраженный нелинейный характер с одним локальным минимумом (рис. 4). Это связано с тем, что при трении металлов существует переход от адгезионного к диффузионному механизму взаимодействия, который связан с температурно-скоростным фактором [7]. В работе А.Д. Макарова [7] дана следующая интерпретация этого факта.

Коэффициент трения в условиях металлообработки действительно зависит от температуры в зоне контакта, которая в свою очередь практически линейно определяется скоростью резания. Сила  $P$ , выталкивающая инструмент из обрабатываемого изделия, также зависит от скорости взаимодействия, здесь значительную роль играют деформационные процессы в материале обрабатываемой детали, т.е. эта сила возрастает с увеличением времени взаимодействия, а время взаимодействия определяется скоростью движения индентора относительно детали, т.е. сила  $P$  — аналог гидродинамической силы [8, 9]:



**Рис. 4. Температурно-скоростные зависимости коэффициентов трения на задней грани инструмента при резании:**

$a$  — зависимость температуры в зоне контакта от скорости резания (сталь "Э",  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,21$  мм/об);  
 $б$  — коэффициент трения для стали "Э",  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,21$  мм/об,  $в$  — коэффициент трения для стали ХН51ВМТЮКФР,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,09$  мм/об;  $г$  — коэффициент трения для стали У12А,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,21$  мм/об

$$P = P_0 e^{-K_P \left( V_x - \frac{d\Delta x}{dt} \right)}, \quad (3)$$

где  $K_P$  — коэффициент, показывающий кривизну падения силы в случае увеличения скорости выглаживания  $V_x$ .

Мощность необратимых преобразований при процедуре выглаживания:

$$M = (F_t + F_w) \sqrt{\left( V_x - \frac{d\Delta x}{dt} \right)^2},$$

где  $F_w$  — сила, согласно принятому в металлообработке подходу к формированию сил резания в координатах площади срезаемого (выглаживаемого) слоя [10, 11], будет определяться выражением:

$$F_w = \sigma_w (h_w - \Delta y) S, \quad (4)$$

где  $\sigma_w$  — предел прочности обрабатываемого металла на сжатие;

$S$  — подача индентора на один поворот детали,

$$S = \int_{t-T_\omega}^t V_p dt = V_p [t - t + T_\omega] = V_p T_\omega;$$

$$T_\omega = \frac{R}{V_x - \frac{d\Delta x}{dt}} \text{ — период вращения обрабатываемой детали.}$$





Общая модель системы управления в матрично-векторном виде и с учетом введенных обозначений:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + H \frac{dx}{dt} + Cx = Q, \quad (5)$$

где  $\begin{cases} x_1 = \Delta x; \\ x_2 = \Delta y; \\ x_3 = \theta \end{cases}$  — вектор координат состояния

процесса выглаживания;

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0065 & 0 \\ 0 & 0,0065 \end{bmatrix} \quad \text{— матрица}$$

коэффициентов инерции;

$$H = \begin{bmatrix} h_{xx} & h_{xy} & 0 \\ h_{yx} & h_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & T_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,16 & 0,032 & 0 \\ 0,032 & 0,17 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 \end{bmatrix} \quad \text{—}$$

матрица коэффициентов диссипации;

$$C = \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} & 0 \\ c_{yx} & c_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1300 & 281 & 0 \\ 281 & 1180 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{—}$$

матрица коэффициентов жесткости;

$$Q = \begin{pmatrix} F_t + F_w \\ P \\ K_\theta M - \theta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 e^{K_P \left( V_x - \frac{d\Delta x}{dt} \right)} \frac{1}{2} (e^{\alpha_2 \theta} + e^{-\alpha_1 \theta}) + \\ + \sigma_w (h_w - \Delta y) \frac{RV_p}{V_x - \frac{d\Delta x}{dt}} \\ P_0 e^{K_P \left( V_x - \frac{d\Delta x}{dt} \right)} \\ K_\theta (P_0 e^{K_P \left( V_x - \frac{d\Delta x}{dt} \right)} \frac{1}{2} (e^{\alpha_2 \theta} + e^{-\alpha_1 \theta}) + \\ + \sigma_w (h_w - \Delta y) \times \\ \times \frac{RV_p}{V_x - \frac{d\Delta x}{dt}} \sqrt{\left( V_x - \frac{d\Delta x}{dt} \right)^2} - \theta_0 \end{pmatrix} \quad \text{—}$$

нелинейная часть уравнения (5), описывающая силовую и тепловую реакцию со стороны процесса на формообразующие движения инструмента.

## Моделирование в среде MatLab и полученные результаты

Первоначально найдем функциональную зависимость между коэффициентом трения и температурой в контакте инструмента и обрабатываемой детали. Для этого определим значения постоянных, входящих в правую часть системы (5).

*Параметры, использованные при моделировании*

$P_0$ , Н	2
$\alpha_1$ , °C <sup>-1</sup>	0,0043
$\alpha_2$ , °C <sup>-1</sup>	0,0006813
$\sigma_w$ , Н/м <sup>2</sup>	1260
$h_w$ , мм	0,2
$K_\theta$	0,0195
$R$ , мм	25
$K_P$ , с/мм	0,000038
$\theta_0$ , °C	25

Учитывая приведенные на рис. 4 примеры, представим эту зависимость следующим графиком (рис. 5).

Из сравнительного анализа рис. 4 и 5 за основу принят вариант обработки, близкий к случаю, указанному на рис. 4, в, г. В окрестностях точек на рис. 5 в дальнейшем будем оценивать динамику системы управления выглаживанием.

Результаты моделирования системы управления с использованием пакета MatLab, при  $n = 650 \text{ мин}^{-1}$ , приведены на рис. 6.

Качество процесса обработки, с точки зрения обеспечения требуемых параметров шероховатости поверхности, при принятом подходе к режиму резания ( $n = 650 \text{ мин}^{-1}$ ),

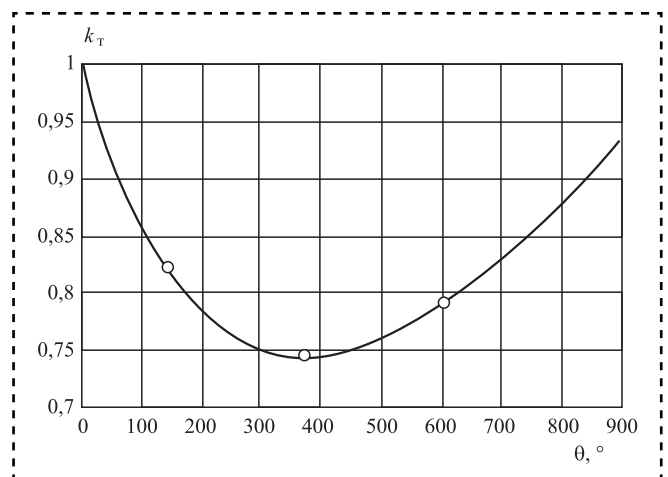
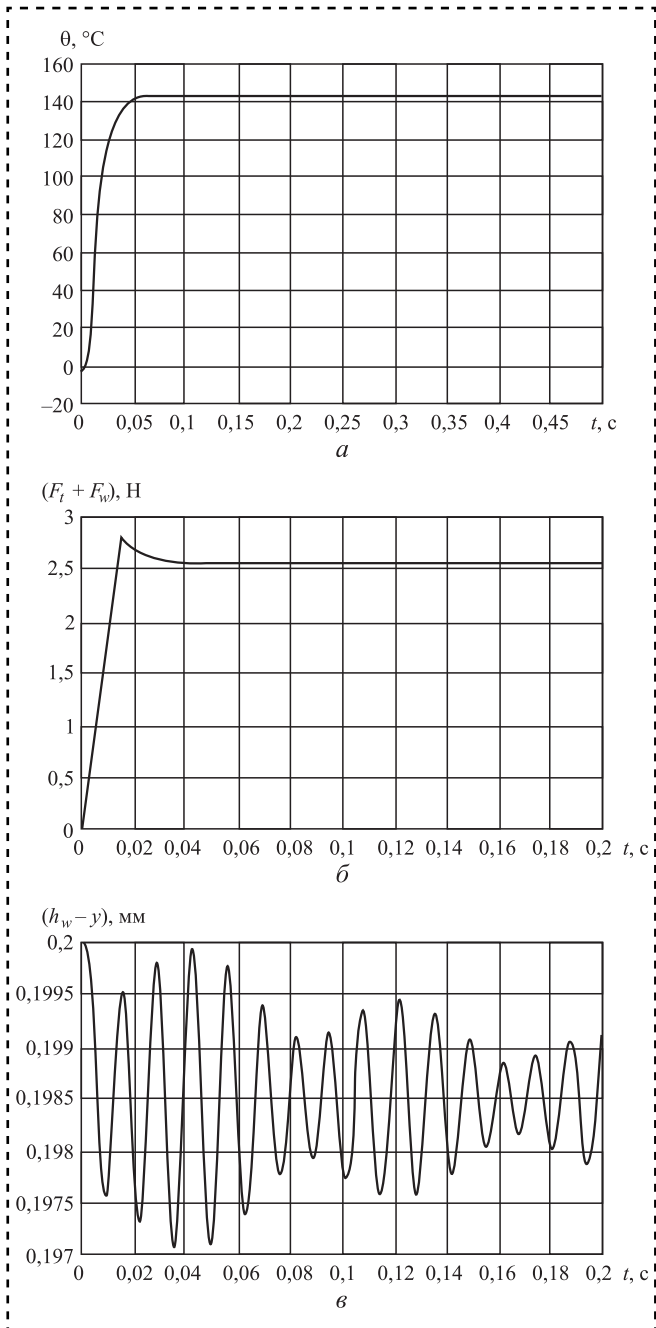


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от температуры в зоне контакта

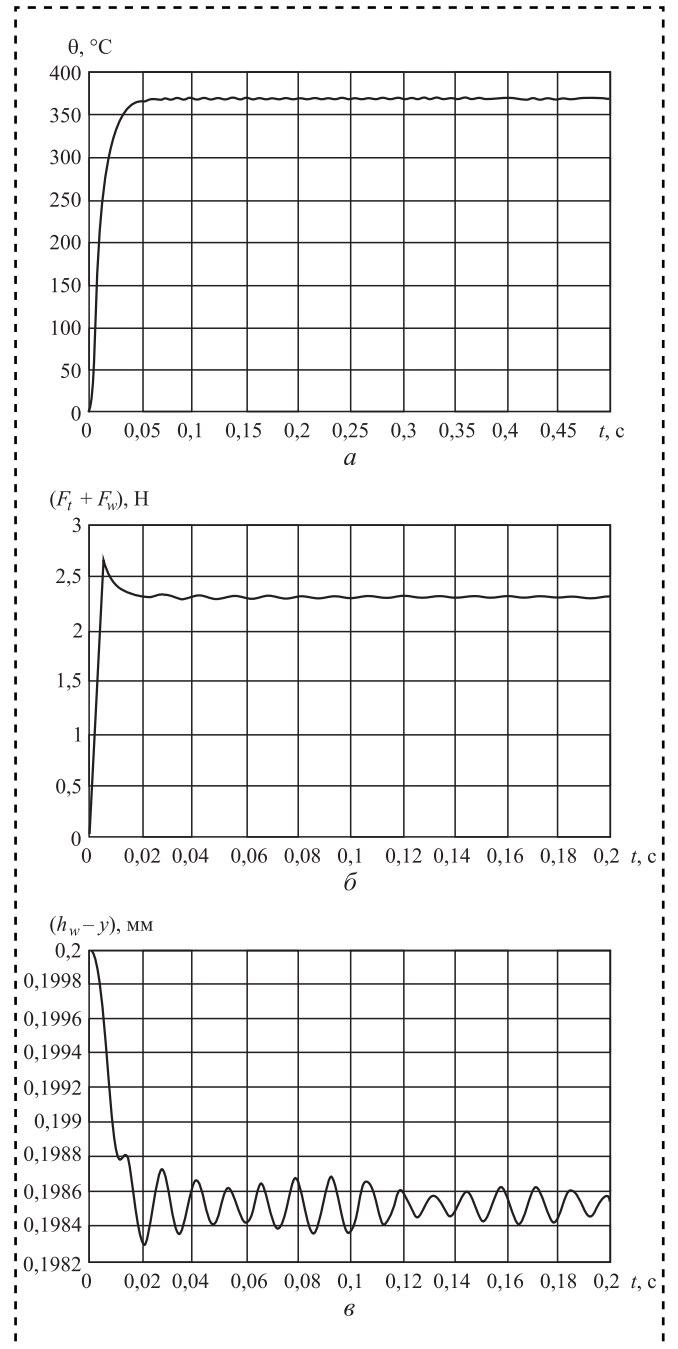


**Рис. 6. Результаты моделирования при  $n = 650 \text{ мин}^{-1}$ :**  
 $a$  — зависимость температуры в зоне контакта от времени;  $b$  — суммарная сила сопротивления формообразующим движениям инструмента;  $c$  — реальная с учетом деформаций глубина выглаживания

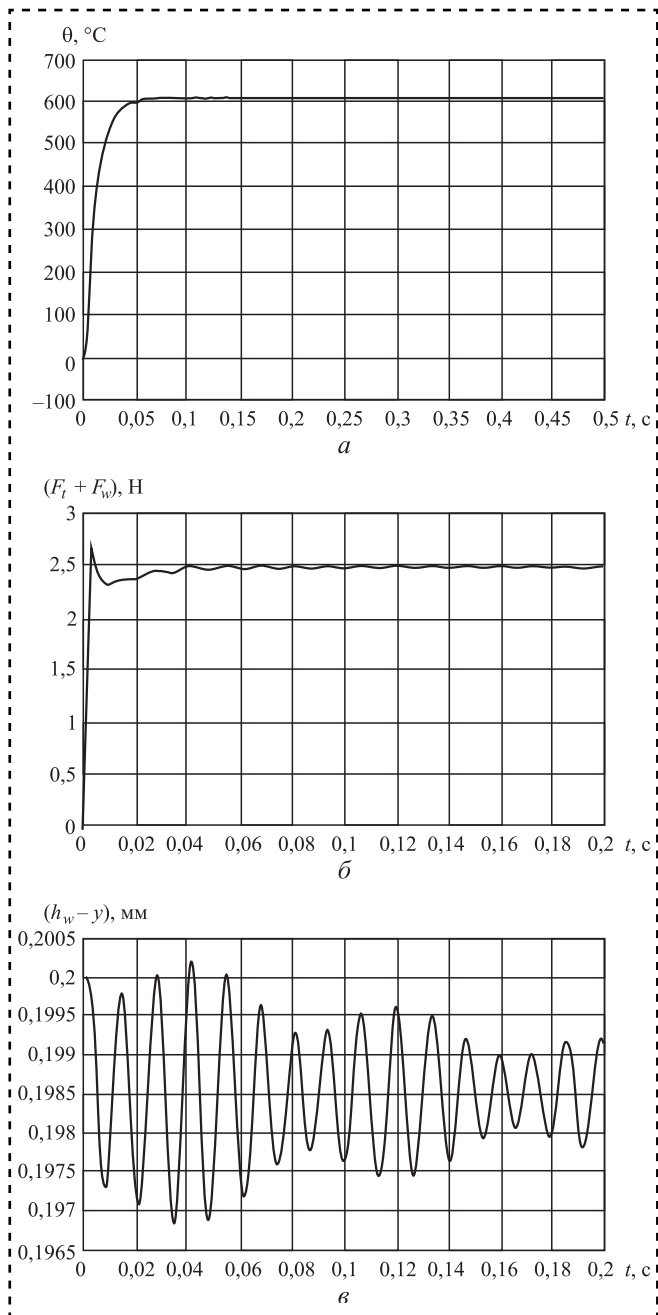
крайне низкое. Значение силы, препятствующей формообразующим движениям инструмента, невелико (чуть больше 2,5 Н), что объясняется малой глубиной внедрения индентора (0,2 мм), и температура в зоне контакта также невелика (около 140 °С). Напомним, что приведенный на рис. 6 вариант динамики системы выглаживания соответ-

ствует первой точке на графике коэффициента трения (см. рис. 5).

Результаты моделирования системы управления в окрестности второй точки — точки минимума графика коэффициента трения (см. рис. 5), приведены на рис. 7.



**Рис. 7. Результаты моделирования при  $n = 1610 \text{ мин}^{-1}$ :**  
 $a$  — зависимость температуры в зоне контакта от времени;  $b$  — суммарная сила сопротивления формообразующим движениям инструмента;  $c$  — реальная с учетом деформаций глубина выглаживания



**Рис. 8. Результаты моделирования при  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ :**  
 $a$  — зависимость температуры в зоне контакта от времени;  $b$  — суммарная сила сопротивления формообразующим движениям инструмента;  $v$  — реальная с учетом деформаций глубина выглаживания

При увеличении скорости выглаживания ( $n = 1610 \text{ мин}^{-1}$ ) качество обработанной поверхности повысилось, что подтверждается существенно меньшей амплитудой колебаний. Сила, препятствующая формообразующим движениям инструмента, уменьшилась, но не значительно, наиболее существенно повысилась температура в зоне контакта инстру-

мента и обрабатываемой детали, благодаря чему коэффициент трения упал до минимума (см. рис. 5). Сила трения при моделировании пропорциональна силе, формируемой на передней грани инструмента, не более чем 30 %, учитывая падение коэффициента трения примерно на 10 %, что говорит о сильном влиянии температуры на динамику системы и слабом влиянии на статику (установившееся значение силы).

Результаты моделирования системы управления выглаживанием при скоростях, превышающих оптимальное значение по трению ( $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ), приведены на рис. 8.

Реализация процедуры выглаживания при скоростях вращения шпинделя больших, чем скорость, обеспечивающая оптимальную (минимальное значение коэффициента трения) температуру в зоне контакта индентора и детали, нецелесообразно, так как качество получаемой поверхности ухудшается.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что предлагаемая в работах А.Д. Макарова гипотеза о существовании оптимальной скорости обработки металлов на металлорежущих станках и соответствующей ей оптимальной температуре обработки, вполне применима и для процесса выглаживания. Пример моделирования системы резания, для которой в части обрабатываемых материалов характерно наличие локального минимума коэффициента трения, позволяет говорить о необходимости предварительного анализа процесса обработки в целях выявления оптимальных скоростей обработки. С научной точки зрения важным достоинством работы выступает синтезированная математическая модель, описывающая динамику процесса выглаживания.

### Библиографический список

1. Долматов А.И., Кабатов А.А., Курин М.А. Исследование и оптимизация технологии алмазного выглаживания деталей из нержавеющей стали для авиационных двигателей и агрегатов // Металлофизика и новейшие технологии. 2013. Т. 35. № 10. С. 1407–1423.



2. **Смирнов А.В.** Технологическое обеспечение качества наружных цилиндрических поверхностей выглаживанием сменными многогранными пластинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Центр науч.-исслед. ин-т технологии машиностроения, 2014. 23 с.

3. **Лихобабина Н.В., Королев А.А.** Упрочнение поверхностей алмазным выглаживанием // Вестник СГТУ. 2008. Т. 1. № 1. С. 17–24.

4. **Губанов В.Ф., Марфицын В.В., Орлов В.Н.** Современная технология выглаживания // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 180.

5. **Бафаев Д.Х.** Алмазное выглаживание поверхностного слоя деталей машин и выбор оптимального режима выглаживания // Молодой ученый. 2016. № 5. С. 16–18.

6. **Бордачев Е.В., Лапшин В.П.** Математическое моделирование температуры в зоне контакта инструмента и изделия при токарной обработке металлов // Вестник ДГТУ. 2019. Т. 19. № 2. С. 130–137.

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

8. **Лапшин В.П.** Модель связи вертикальных деформаций с возникновением циркуляционных сил в системах "Колесо—рельс" // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11. № 8. Вып. 2. С. 1424–1431.

9. **Лапшин В.П., Туркин И.А., Носачёв С.В.** Модель связи упруго-вязкого смещения поверхности колеса относительно рельса с тяговыми характеристиками // Вестник ДГТУ. 2012. № 5 (66). С. 40–49.

10. **Лапшин В.П., Тюняев Р.А., Христофорова В.В.** Оценка влияния скорости подачи на равновесные режимы привода, обеспечивающего фрезерование заготовки переменной толщины // Динамика технических систем: сб. тр. 2016. С. 180–184.

11. **Лапшин В.П., Бабенко Т.С., Христофорова В.В.** Об одном частном случае синтеза системы управления процессом обработки металлов точением // Вестник ДГТУ. 2017. Т. 17. № 1 (88). С. 75–84.

УДК 621.684:629.5.083.5

DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-3-172-179

**А.Я. Розинов**, д-р техн. наук

(АО "Центр технологии судостроения и судоремонта", г. Санкт-Петербург)

E-mail: inbox@sstc.spb.ru

## Технические решения вибробезопасности холодной клепки выполняемого судоремонта

*Представлены сравнительные данные нагрева и остывания заклепок из стали и алюминиевого сплава, а также данные по заполнению этими заклепками отверстий при выполнении горячей и холодной клепки. Рассмотрены особенности процесса холодной ударной клепки прямым и обратным способами, а также возможности уменьшения усилий клепки путем совершенствования замыкающих головок и конструктивного преобразования самих заклепок. Определены особенности физиологического влияния холодной ударной клепки на кисти рук, локти и плечи рабочих. Описаны конструкции клепальных молотков и поддержек с пружинными амортизаторами, предотвращающие заболевание рабочих вибрационной болезнью, а также конструкция переносных клепальных прессов пневморычажного и гидравлического действия. Дано описание прессового оборудования и технологии выполнения болтозаклепочных соединений, позволяющих механизировать процесс холодной клепки.*

*The parameters of heating and cooling of rivets made of steel and aluminum alloy, as well as data of filling holes with these rivets during hot and cold riveting are compared. The features of the process of performing cold impact riveting by direct and reverse methods, as well as the possibility of reducing the force of this riveting by improving the closing heads and constructive transformation of the rivets themselves are considered. Features of physiological influence of cold shock riveting on hands, elbows and shoulders of workers are determined. Describes the construction of riveting hammers and supports with spring shock absorbers that prevent the disease of workers vibration disease, portable riveting presses of pneumatic and hydraulic action. A description of the press equipment and technology of bolt-riveting connections, allowing mechanizing the process of cold riveting is given.*

**Ключевые слова:** заклепочные отверстия, физика формирования, температура нагрева и остывания, деформации соединяемых конструкций, закладная и замыкающие головки, плотность, прочность, прямой и обратный способы клепки, составные заклепки, вибрационная нагрузка, упругость, колебательная скорость, потери, частотная зависимость, поражение мышц, кисти руки, локти, плечи, резонанс, затухание колебаний, клепальные молотки и поддержки, пружинные амортизаторы, прессовая клепка, клепальные прессы, болт, заклепка.

**Keywords:** rivet hole, physics of formation, heating and cooling temperature, deformations of connected structures, set and closing heads, density, durability, direct and inverse methods of riveting, compound rivets, vibration load, resilience, vibrational speed, losses, frequency dependence, muscle damage, hands, elbows, shoulders, resonance, damping, riveting hammers and supports, spring shock absorbers, press riveting, riveting presses, bolt, rivet.



На протяжении многих лет постройка судов была связана с применением горячей клепки. В начале 50-х гг. XX века клепку заменили сваркой, однако горячей клепкой по-прежнему выполняли барьерные соединения и соединения стрингерных угольников верхних палуб.

Существенно расширилось применение клепки в 60-х гг. XX века, когда при изготовлении судовых корпусов начали применять материалы, значительно отличающиеся от стали механическими и теплофизическими свойствами. В частности, конструкции из алюминиевых сплавов можно соединить со стальными не сваркой, а холодной клепкой.

В настоящее время горячая и холодная клепка — неотъемлемая часть технологии ремонта корпусов судов, построенных ранее с применением заклепочных соединений. Одно из главных условий эффективного выполнения этого ремонта — обязательное обеспечение вибробезопасности холодноклепанных соединений судовых корпусных конструкций.

Традиционно соединения, выполненные горячей и холодной клепкой, выглядят конструктивно одинаковыми. Также одинаковы технология подготовки заклепочных отверстий, применяемый при этом инструмент и оценка качества выполненных заклепочных соединений. Однако различная физика формирования заклепок и осуществление технологического процесса клепки требуют использования различных оборудования и инструмента.

Соединения стальных конструкций на стальных заклепках выполняют методом горячей клепки. Исключением являются соединения, выполняемые с применением заклепок диаметром 8 мм и менее, расклепываемых в хо-

лодном состоянии. Конструкции из алюминиевых сплавов между собой или со стальными конструкциями на заклепках из алюминиевых сплавов всегда соединяют методом холодной клепки. Горячая клепка такими заклепками невыполнима из-за невозможности нагрева алюминиевых заклепок выше 500 °С, что в два раза ниже температуры нагрева стальных заклепок (1000...1100 °С). При этом остывание заклепок из алюминиевого сплава происходит с большей скоростью, чем стальных, так как теплопроводность алюминиевых сплавов в три раза выше, чем у стали.

За период передачи заклепок из алюминиевого сплава от места их нагрева (период охлаждения на воздухе) к месту их расклепывания (период охлаждения в заклепочном отверстии) они успевают остыть до 150 °С. За такое же время стальные заклепки охлаждаются до 880 °С (таблица). Таким образом, температура нагрева заклепок из алюминиевых сплавов к началу клепки должна быть близкой к 500 °С. Выполнить это условие можно только путем нагрева используемых заклепок при их нахождении непосредственно в отверстиях соединяемых корпусных конструкций. Однако в практике отечественного судостроения оборудования для нагрева заклепок в заклепочных отверстиях нет. Поэтому все заклепки из алюминиевых сплавов независимо от их диаметра расклепывают в холодном состоянии.

Холодная клепка отличается от горячей тем, что ее применение вызывает существенно большие деформации соединяемых конструкций, при этом исполнители холодной клепки в большей степени подвержены опасности заболевания вибрационной болезнью.

Охлаждение заклепок после нагрева

Время с момента окончания нагрева, с	Охлаждение используемых заклепок	Температура охлаждения заклепки, °С	
		из алюминиевого сплава	из стали
5	На воздухе	500	1100
10	В заклепочном отверстии	470	960
15	При выполнении клепки	150	880
20		50	800
25		—	780
30		—	740
35		—	700

При горячей клепке находящаяся в отверстии сформированная заклепка, остывая, уменьшается в продольном и поперечном направлениях. Вследствие продольного сокращения стержня заклепки ее закладная и замыкающая головки плотно стягивают кромки соединяемых судовых корпусных конструкций и тем самым обеспечивают плотность и прочность заклепочного соединения. В результате поперечного сокращения стержня заклепки увеличивается зазор между стержнями заклепок и стенками заклепочных отверстий (рис. 1, а). При холодной клепке стержень заклепок целиком заполняет ранее рассверленное отверстие. Это объясняется тем, что заклепка не имеет температурной усадки и поэтому диаметр ее стержня остается таким, каким он стал под воздействием силы клепки. Диаметр стержней расклепываемых заклепок, а вместе с ними и диаметр заклепочных отверстий, со стороны сформированных замыкающих головок заклепок, — увеличиваются (рис. 1, б).

В связи с тем, что при холодной клепке отсутствует температурная усадка (рис. 1, б), необходимая прочность и плотность заклепочных соединений обеспечиваются плотностью заполнения заклепочного отверстия деформированным стержнем используемых заклепок. Однако изменение диаметра стержней заклепок и отверстий при холодной клепке вызывает деформацию кромок соединяемых судовых корпусных конструкций, следствием которой является расхождение (нарушение контакта) прилегающих поверхностей этих конструкций в промежутках между сборочными болтами, устанавливаемыми в процессе сборки соединений "под клепку".

В целях устранения указанного недостатка в начале выполнения холодной клепки со-

единений судовых корпусных конструкций первые заклепки ставят вокруг или в непосредственной близости к сборочным болтам, а затем выполняют остальные соединения, расположенные между сборочными болтами. При этом в случае соединения методом холодной клепки конструкций из однородных материалов разной толщины или соединения конструкций из алюминиевых сплавов и стали замыкающие головки заклепок формируют со стороны конструкции большей толщины либо со стороны конструкций из стали.

В зависимости от применяемого оборудования холодная клепка может быть ударной или прессовой. При ударной клепке замыкающие головки заклепок формируют с помощью динамических сил, а при прессовой — под действием постепенно прилагаемого давления.

При ударной холодной клепке, также как при ударной горячей клепке, используют пневматические молотки и подпорки. Однако, в отличие от горячей клепки, холодная ударная клепка может быть осуществлена прямым и обратным способами.

Прямой способ холодной клепки характеризуется тем, что удары пневматического молотка наносят по выступающему стержню заклепки, формируя тем самым ее замыкающую головку. При этом с помощью пневматических или винтовых стационарных подпорки прижимается закладная головка расклепываемой заклепки.

При обратном способе холодной клепки осаживание стержня заклепки и формирование ее замыкающей головки происходит вследствие колебаний соединяемых конструкций. Удары клепального молотка в этом случае передаются на закладную головку расклепываемой заклепки, а от нее — на соединяемые конструкции, которые, вибрируя, позволяют ударами конца стержня заклепки о подпорку, находящуюся в руках подручного клепальщика, осаживать стержень заклепки в отверстии и формировать замыкающую головку.

Обратный способ холодной клепки более производительен, чем прямой. Применение этого способа для выполнения соединений судовых конструкций из алюминиевых сплавов сокращает время клепки на 10...15 % по сравнению с ударной клепкой прямым способом. Однако его физические особенности позволяют использовать обратную ударную клепку только для выполнения соединений тон-

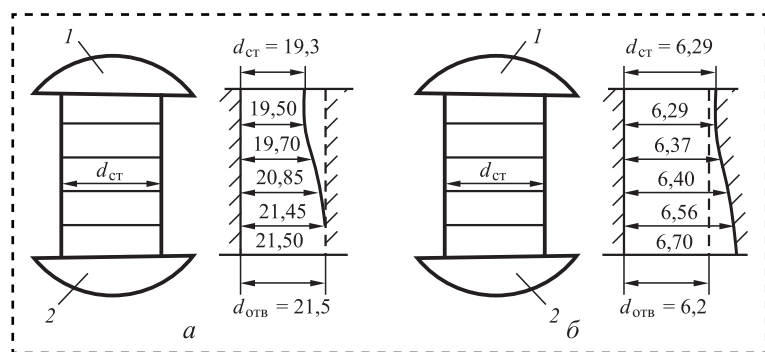


Рис. 1. Заполнение заклепочного отверстия стержнем заклепки при горячей (а) и холодной (б) клепке:

1 — закладная головка; 2 — замыкающая головка



колистых конструкций алюминиевыми заклепками диаметром не более 8 мм и стальными заклепками — не более 6 мм.

Прямой способ холодной клепки в отличие от прямого способа горячей клепки требует приложения существенно больших сил, а также увеличенных трудозатрат, связанных с заполнением материала стержня заклепочного отверстия и формированием замыкающих головок. Объясняется это тем, что даже при расклепывании заклепок из алюминиевого сплава пластичность их материала оказывается меньшей, чем пластичность стали, разогретой до 1000...1100 °С. В целях снижения влияния указанных отрицательных факторов холодной клепки прямым способом в кромках соединяемых корпусных конструкций рассверливают отверстия диаметром на 20...25 % меньшим, чем диаметры заклепочных отверстий, рассверливаемых для горячей клепки.

Для облегчения проведения холодной ударной клепки изменяют формируемые замыкающие головки расклепываемых заклепок.

При холодной клепке на формирование полукруглых замыкающих головок требуется в два раза больше сил, чем на формирование плоских головок. Поэтому при выполнении ударной холодной клепки обратным способом у алюминиевых заклепок всех диаметров формируют плоские замыкающие головки, способствующие хорошему заполнению заклепочных отверстий материалом стержней.

Уменьшение усилий при холодной ударной клепке прямым способом может быть обеспечено путем изменения формы стандартных полукруглых, полупотайных и потайных замыкающих головок заклепок средних размеров. Для этого в торцах стержней заклепок просверлива-

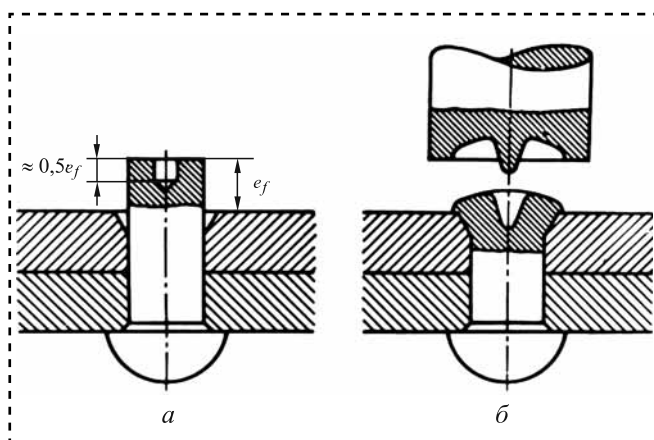


Рис. 2. Подготовка к выполнению клепки (а) и формирование замыкающих головок заклепок с центральным углублением (б)



Рис. 3. Основные элементы составной заклепки

ют отверстия (рис. 2, а), с использованием которых формируют замыкающие головки с центральным углублением (рис. 2, б). Наличие этих углублений не влияет на обеспечение соединением необходимой прочности и плотности.

В связи с затруднениями выполнения холодной ударной клепки прямым способом заклепок больших диаметров, вместо монолитных традиционных заклепок могут быть использованы составные заклепки, включающие детали, изготовленные из одинакового материала. Основные части составных заклепок (рис. 3): трубчатый стержень, протяженностью равный суммарной толщине склепываемых конструкций, замыкающая и закладные головки, соединительный штырь. В процессе ударной холодной клепки соединительный штырь расклепывается и тем самым заполняет трубчатый стержень, стягивает закладную и замыкающие головки, формируя составную заклепку полностью. При этом заклепкой заполняется отверстие, ранее рассверленное в кромках соединяемых корпусных конструкций.

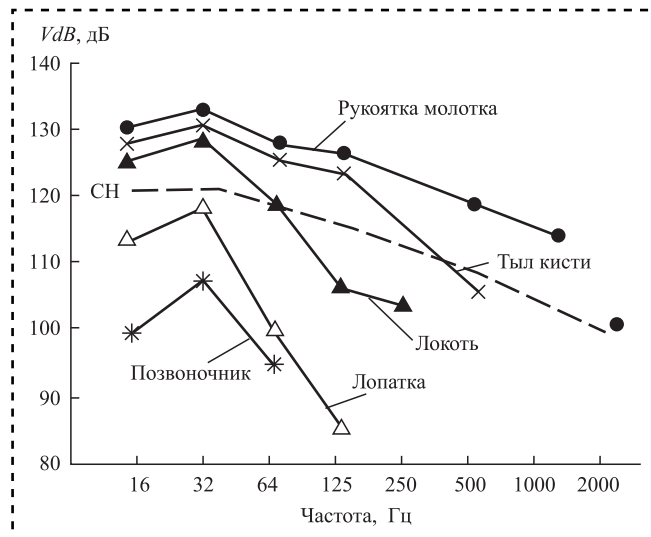
Изменение формы замыкающих головок заклепок и применение составных заклепок позволяет уменьшить силы при проведении холодной ударной клепки с помощью клепальных молотков, которые внешне и по техническим характеристикам подобны используемым при горячей клепке а также клепальных молотков пистолетного типа, применяемых для выполнения холодной обратной клепки.

Физиологи установили, что негативное воздействие вибрации на организм работающих с клепальными молотками и подпорками определяется конструктивными особенностями используемых технических средств выполнения клепки, влиянием основных факторов производственной среды, временем непосредственного контакта с применяемыми средствами выполне-

ния клепки и реакцией работающих на выполняемую работу в условиях мышечного и нервного напряжения. Также большое значение имеет поза работающего во время выполнения клепки.

В процессе ударной клепки руки работающих могут быть представлены эквивалентной системой, состоящей из сосредоточенных масс упругостей и сопротивлений. Коэффициенты, характеризующие упругость, массы и колебательные потери работающей руки, зависят, главным образом, от степени напряженности мышц руки и позы работающих. Частотная зависимость импеданса (отношения силы к вызываемой ею колебательной скорости движения) на рукоятке клепального молотка в условиях выполнения клепки имеет максимум в области частот 30...40 Гц, что соответствует резонансу системы, включающей эффективную массу руки (примерно 1 кг) и упругости мягких тканей внутренней стороны кисти руки. Механическая система прямой руки человека имеет резонанс в области частот 40...50 Гц. При передаче колебаний от ладони к тыловой стороне кисти руки амплитуда колебаний при неизменной частоте 40...50 Гц уменьшается на 35...65 %. На участках руки между кистью и локтем, локтем и плечом происходит дальнейшее ослабление колебаний. Наибольшее затухание колебаний происходит в плечевом суставе и позвоночнике работающего со средством выполнения холодной ударной клепки (рис. 4).

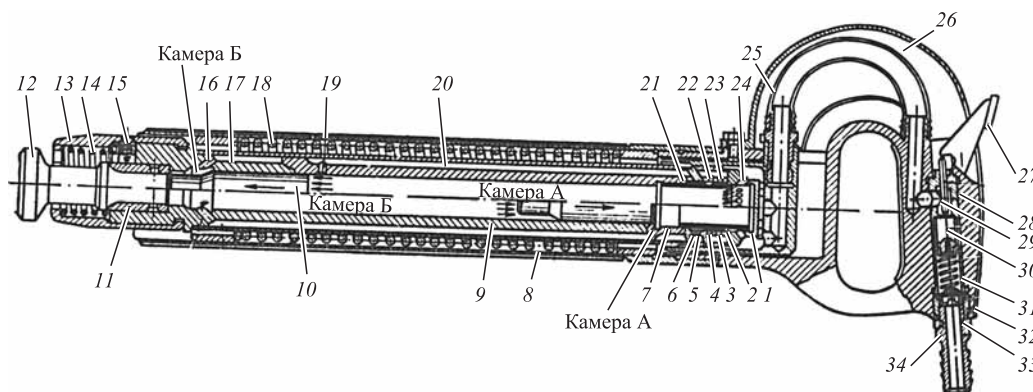
Интенсивное воздействие вибрационной нагрузки приводит к заболеванию рук, называемому вибрационной болезнью.



**Рис. 4.** График изменения частоты колебаний применяемых средств клепки, руки и тела работающего под воздействием вибрационной нагрузки ( $VdB$  — виброскорость; СН — стандартная норма)

Результаты изучения физики колебаний пневматического инструмента ударного действия послужили физиологическим основанием для технических решений, направленных на обеспечение вибробезопасности холодной ударной клепки. Пример таких решений — разработка пневматических клепальных молотков с защитой от воздействия вибрации, выполненной в виде пружинного амортизатора (рис. 5).

Применение пневматических клепальных молотков с пружинным амортизатором совместно со стационарными пневматическими или винтовыми подержками надежно защи-



**Рис. 5.** Пневматический клепальный молоток с пружинным амортизатором:

1 — золотниковая коробка; 2 — золотник; 3—7 — воздушные каналы; 8 — ствол; 9 — рабочий цилиндр; 10 — ударник; 11 — концевая буска; 12 — обжимка; 13 — зажимной патрон; 14 — пружина патрона; 15 — стопор; 16, 17 — воздушные каналы; 18 — пружинный амортизатор; 19—24 — воздушные каналы; 25 — гибкая воздушная трубка; 26 — рукоятка; 27 — курок; 28 — толкатель; 29 — клапанная втулка; 30 — впускной клапан; 31 — пружина клапана; 32 — фильтр воздуха; 33 — штуцер; 34 — наконечник



щает клепальщиков от заболевания вибрационной болезнью при выполнении ими холодной ударной клепки прямым способом.

Аналогичная противовибрационная защита может быть использована для клепальных молотков пистолетного типа, применяемых для выполнения холодной ударной клепки обратным способом. При выполнении холодной ударной клепки этим способом наибольшей опасности заболевания вибрационной болезнью подвергается не клепальщик, а его подручный, руками которого формируются замыкающие головки расклепываемых заклепок. В начальный момент обратной холодной ударной клепки вибрационное воздействие клепального молотка передается на руки подручного через стержень заклепки, свободно перемещающийся в заклепочном отверстии. По мере выполнения холодной обратной ударной клепки стержень заклепки деформируется и его материал заполняет заклепочное отверстие, вовлекая тем самым в колебания клепки соединяемые корпусные конструкции. По мере уплотнения материала стержня в заклепочном отверстии и расширения последнего колебания соединяемых клепкой корпусных конструкций значительно возрастают, создавая тем самым опасность профессионального заболевания. В этом случае следует использовать ручные поддержки с виброгасящим устройством в виде пружинного амортизатора (рис. 6).

Технологический путь обеспечения виброопасности холодной клепки соединений судовых

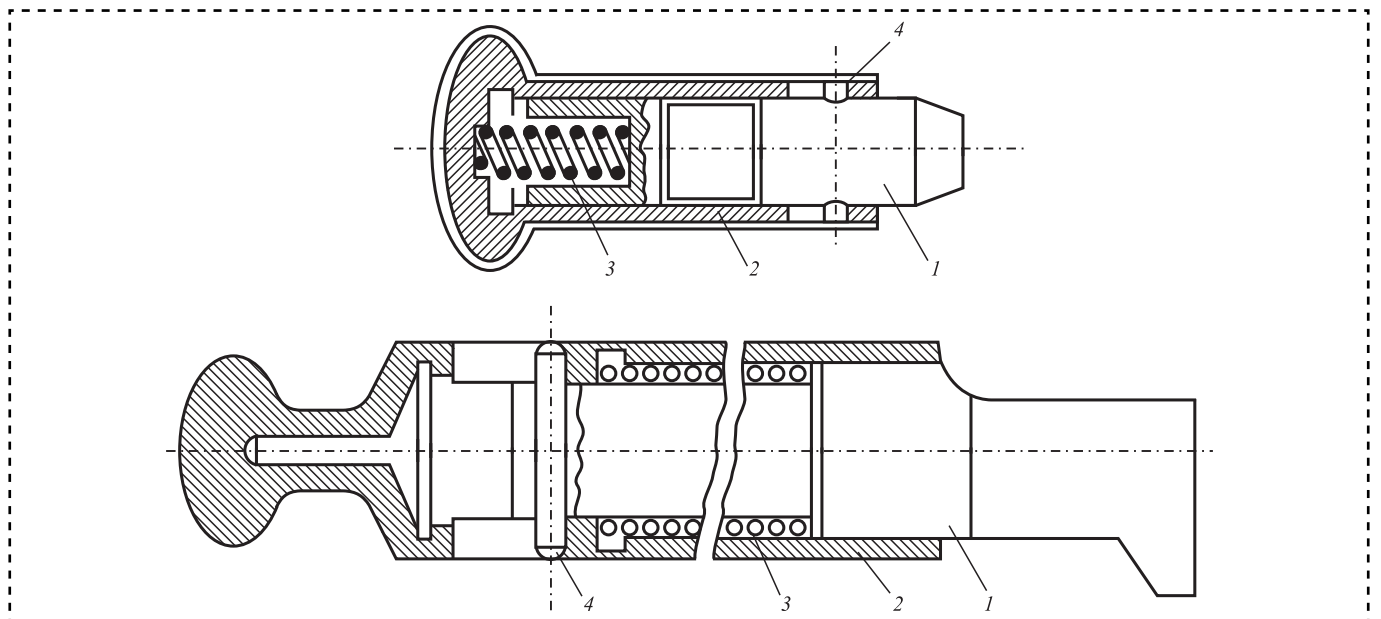
корпусных конструкций — ее выполнение пресовым методом, позволяющим повысить производительность труда и исключить опасность заболевания клепальщиков вибрационной болезнью.

Для выполнения холодной пресовой клепки в условиях сборочно-сварочного цеха целесообразно применение пневморычажных, пневматических, пневмогидравлических и гидравлических прессов (рис. 7). С применением этого оборудования могут быть выполнены заклепочные соединения стальных комингсов с судовыми конструкциями из алюминиевых сплавов.

В условиях ремонта корпусов судов на стапельном месте или в ремонтном доке холодная пресовая клепка возможна выполнением болтозаклепочных соединений, позволяющих полностью механизировать процесс клепки. Для этого используют ручные пневмогидравлические прессы (рис. 8).

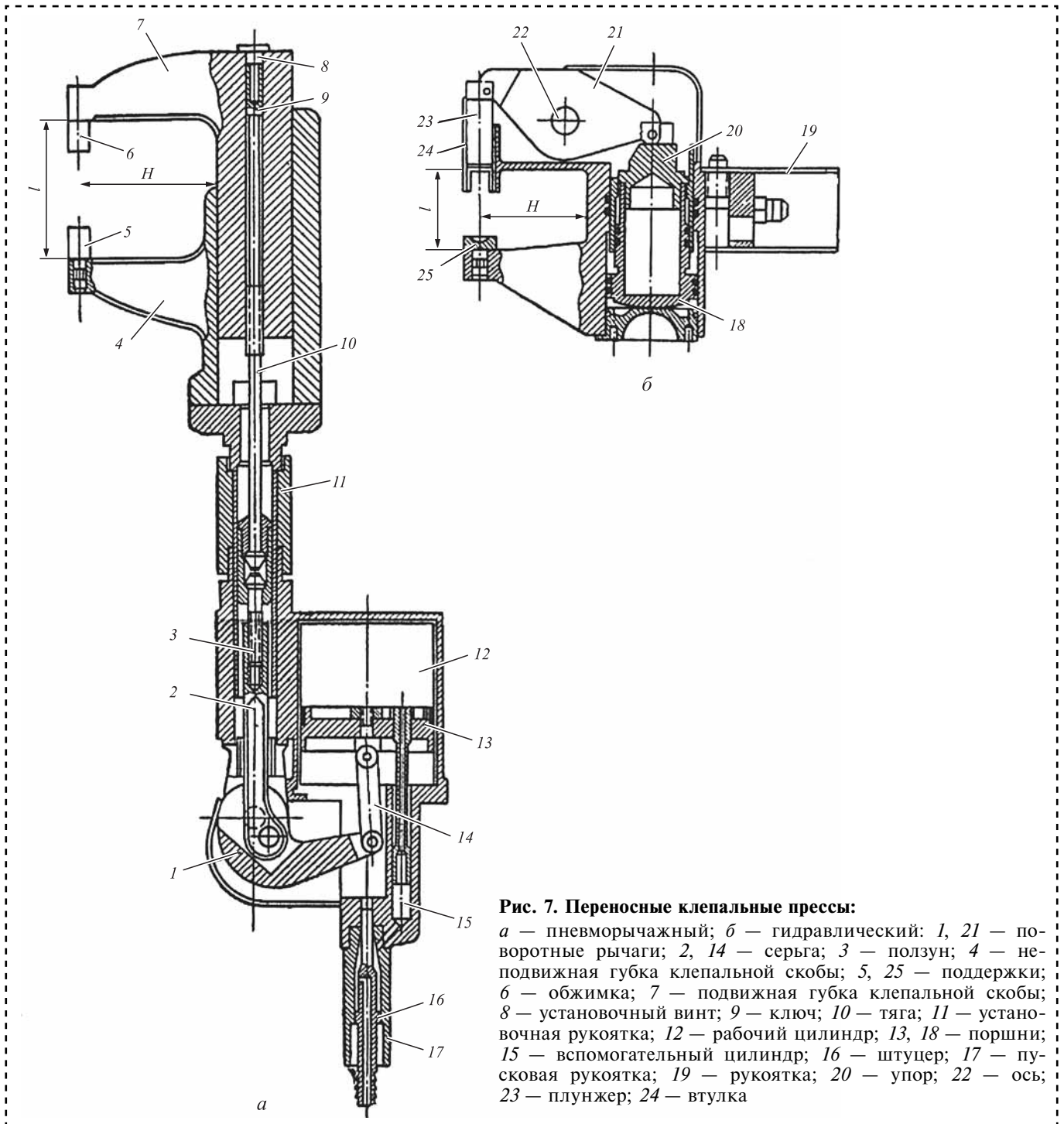
С помощью пневмогидравлического прессы выполняют холодную клепку болтозаклепок (рис. 9), представляющих собой стержень с кольцевой (накатной) нарезкой, разрывной шейкой, гладким цилиндрическим участком, примыкающим к закладной заклепочной головке, а также отдельным обжимным кольцом. Болтозаклепки изготавливают из прочного алюминиево-магниевого сплава, а обжимное кольцо — из сплава повышенной вязкости (рис. 9, а).

Первоначально стержень болтозаклепок вставляют в заранее рассверленные отверстия и на выступающий конец стержня надевают



**Рис. 6. Конструктивные варианты ручных поддержек с пружинным амортизатором:**

1 — рабочая часть; 2 — корпус; 3 — пружинный амортизатор; 4 — направляющий штифт



**Рис. 7. Переносные клепальные прессы:**

*а* — пневморычажный; *б* — гидравлический: 1, 21 — поворотные рычаги; 2, 14 — серьга; 3 — ползун; 4 — неподвижная губка клепальной скобы; 5, 25 — поддержки; 6 — обжимка; 7 — подвижная губка клепальной скобы; 8 — установочный винт; 9 — ключ; 10 — тяга; 11 — установочная рукоятка; 12 — рабочий цилиндр; 13, 18 — поршни; 15 — вспомогательный цилиндр; 16 — штуцер; 17 — пусковая рукоятка; 19 — рукоятка; 20 — упор; 22 — ось; 23 — плунжер; 24 — втулка

гладкое обжимное кольцо. Отверстие кольца больше диаметра среднего участка болтозаклепки с мелкими и крупными накатными ребрами и оно свободно доходит до поверхности соединяемых конструкций.

Затем выступающий конец стержня болтозаклепки с мелкими накатными ребрами зажимают цанговым захватом, установленным на выступающий конец пневмогидравлического

клепального прессы так, чтобы мелкая накатка стержня надежно сцепилась с зубчатым цанговым захватом прессы (рис. 9, б). При рабочем ходе прессы цанговый захват, двигаясь вверх, потянет за собой стержень болтозаклепки, который свободно скользит в отверстии обжимного кольца и в отверстиях соединяемых конструкций до тех пор, пока закладная головка болтозаклепки не упрется в поверхность одной из соеди-





**Е.И. Самаркина, А.И. Самаркин, С.И. Дмитриев, канд-ты техн. наук, Е.А. Евгеньева**  
(Псковский государственный университет)  
E-mail: dmitrievsi55@gmail.com

## Особенности многопользовательской работы с большими сборками на примере системы Onshape

*Рассмотрены возможности и особенности применения облачных систем при моделировании больших сборок в машиностроении и приборостроении.*

*The possibilities and features of the use of cloud systems in modeling large assemblies in mechanical engineering and instrumentation are considered.*

**Ключевые слова:** большие сборки, облачные системы, моделирование, САПР.

**Keywords:** large assemblies, cloud systems, modeling, CAD.

В настоящее время на рынке САПР имеется ряд систем и приложений, которые, как правило, включают возможность моделирования сборок. На практике при использовании САПР пользователи столкнулись с трудностями в так называемых "больших сборках". Ведь по мере увеличения числа деталей в сборке усложняется моделирование.

Цель работы — показать результаты и методические решения, которые сформировались в процессе апробации в среде облачной САПР подходов моделирования больших сборок, традиционно используемых в настольных САПР.

Число собираемых деталей и сборочных единиц в больших сборках колеблется от 1000 до 100 000 единиц. Большое число или сложность деталей в сборке отрицательно влияет на производительность аппаратного обеспечения и, как следствие, снижает производительность САПР-инструментов. Кроме того, большие сборки разрабатываются коллективно, что дополнительно усложняет процесс проектирования изделия.

На сегодняшний день нет единого решения, позволяющего обеспечить высокую производительность аппаратного обеспечения при моделировании больших сборок. Разработчики САПР предлагают различные пути увеличения производительности при работе с большими сборками [1]:

— упрощение компонентов, например, автоматическое исключение фасок, скруглений, заведомо невидимых элементов или созда-

ние специальных упрощенных конфигураций изделий для представления в сборках;

— оптимизация отображения — отключение ресурсоемких расчетов теней, отражений и прозрачности, снижение качества тесселяции объектов, оптимизация алгоритмов отсечения невидимых частей изображения и т.п.;

— улучшение модели за счет использования скоростных с точки зрения расчетов элементов, например геометрических массивов;

— использование программного обеспечения совместной или коллективной работы — PDM-систем.

Порядка 80 % пользователей САПР-системами для обеспечения коллективной работы и обмена САПР-файлами применяют электронную почту [2]. Второе и третье места среди наиболее употребляемых методов обмена информацией занимает использование общих папок на локальном или FTP-сервере. То есть при совместном проектировании подавляющее большинство САПР-пользователей полагается на технологии конца прошлого века.

При использовании подобных методов каждый пользователь разрабатывает модель сборки своей сборочной единицы и формирует все электронные документы на своем рабочем месте, а чтобы использовать в своей сборке модели деталей и сборочные модели, разработанные другими пользователями, обращается за файлами моделей деталей и сборочных единиц, размещенными на сервере.



Управление информационными процессами, обеспечивающими совместную разработку, в общем виде включает:

- отслеживание и поддержку разных версий САД-файлов;
- распределение задач по участникам проекта;
- контроль их выполнения;
- обмен информацией в коллективе и т.п.

Можно сделать следующие выводы:

- большая сборка требует больших ресурсов локального компьютера, который не может их предоставить;
- с большой сборкой надо работать коллективно, а такая работа требует определенной организации.

В облачных САПР есть необходимые возможности, которые позволяют организовать коллективную работу над большой сборкой и обеспечить при этом высокую производительность на любом локальном компьютере, подключенном к глобальной сети.

Чтобы проиллюстрировать эти возможности в качестве примера облачной САПР выбрана система *Onshape*.

### Особенности моделирования в системе *Onshape*

Наибольший интерес вызывает в настоящее время применение облачных сервисов (*Softline* — САПР в облаке).

Программное обеспечение настольной САПР необходимо устанавливать на рабочем месте пользователя. Поэтому возможности настольных САД-систем ограничены локальными аппаратными ресурсами.

Облачные системы обладают практически неограниченными ресурсами. Преимущество облачных систем — возможность их использования на слабых компьютерах, так как вся работа происходит в "облаке" [3]. Эта возможность позволяет решить проблему недостаточной производительности локальных компьютеров при работе с большими сборками. Поэтому именно облачная САПР хорошо подходит для работы с большими сборками.

В 2015 году компания *Onshape* выпустила одноименный продукт *Onshape* — полностью облачное САД-решение, которое запускается через интернет-браузер, причем без загрузки или установки каких-либо дополнительных приложений на рабочем месте пользователя. Особое конкурентное преимущество *Onshape* — возможность совместного ведения проектов [2].

Число этапов в процессе создания сборочной модели в этой системе на треть меньше, чем при использовании сопоставимых настольных САД-систем.

Рассмотрим подробнее особенности работы в среде облачной САД-системы.

Основой для работы служит Документ *Onshape* в терминологии *Onshape*, рабочее пространство (*workspace*) с множеством вкладок (*tabs*). Они выглядят как листы электронной таблицы.

На рис. 1 приведена упрощенная файловая структура модели данных большой сборки, которая формируется при использовании программного обеспечения совместной работы *Solid Works* с выделенным сервером, и структура документа, формируемая в *Onshape*.

Если в *Onshape* использовать общие папки, то каждый документ *Onshape* будет содержать только один тип данных, а документ сборки будет содержать ссылки на документы компонентов. Но тогда возникают и сложности, связанные с коллективной разработкой изделия, приведенные выше.

В отличие от *Solid Works*, при использовании облачной среды *Onshape*, можно задействовать в разработке изделия всех пользователей одновременно за счет редактирования одного документа, содержащего всю конструкторскую информацию об изделии (рис. 2).

Тогда каждая модель — компонент изделия, создается не в отдельном документе, а в одной из вкладок открытого документа *Onshape*.

Документ *Onshape* содержит по умолчанию:

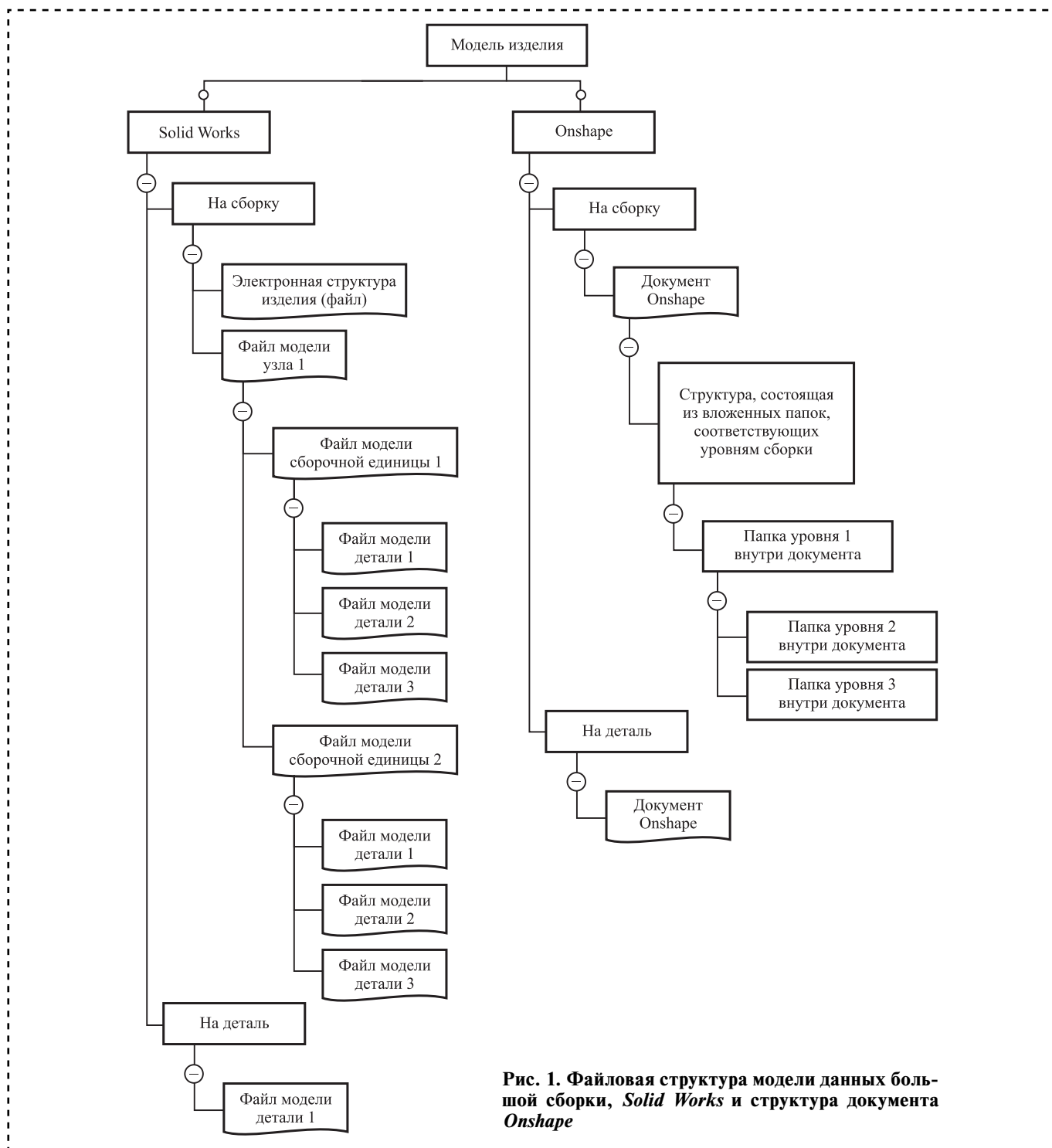
- вкладку "Студии детали";
- вкладку "Студии сборки";
- отдельные папки;
- иерархию папок.

Вкладки содержат:

- детали;
- сборки;
- импортированные модели сборок, деталей, чертежей;
- файлы PDF, текстовые документы, данные управляющих программ ЧПУ.

Вкладки можно объединять в папки, которые образуют иерархическую структуру, соответствующую уровням сборки.

В представлении большинства пользователей папка — это хранилище файлов и других папок. В *Onshape* папка — это хранилище информации разных вкладок одного документа *Onshape*, сгруппированных таким образом, чтобы было удобно работать пользователю, например, по принадлежности к одной сборочной единице.



**Рис. 1. Файловая структура модели данных большой сборки, *Solid Works* и структура документа *Onshape***

Весь набор папок и вкладок документа *Onshape* может быть обработан как одна сущность: им можно поделиться, его версии контролируются. Это очень важно при коллективной работе над проектом и при работе с большими сборками.

Вкладки позволяют хранить более одного типа данных в одном документе (аналог — лист в книге *Excel*). Для работы с разными дан-

ными (чертежи, детали, сборки) используются разные студии и таким образом на вкладках создаются экземпляры разных студий (вместо окон открытых документов при традиционном моделировании).

Вкладки *Part Studio* и *Assembly* содержат инструменты, предназначенные для моделирования деталей и сборок.

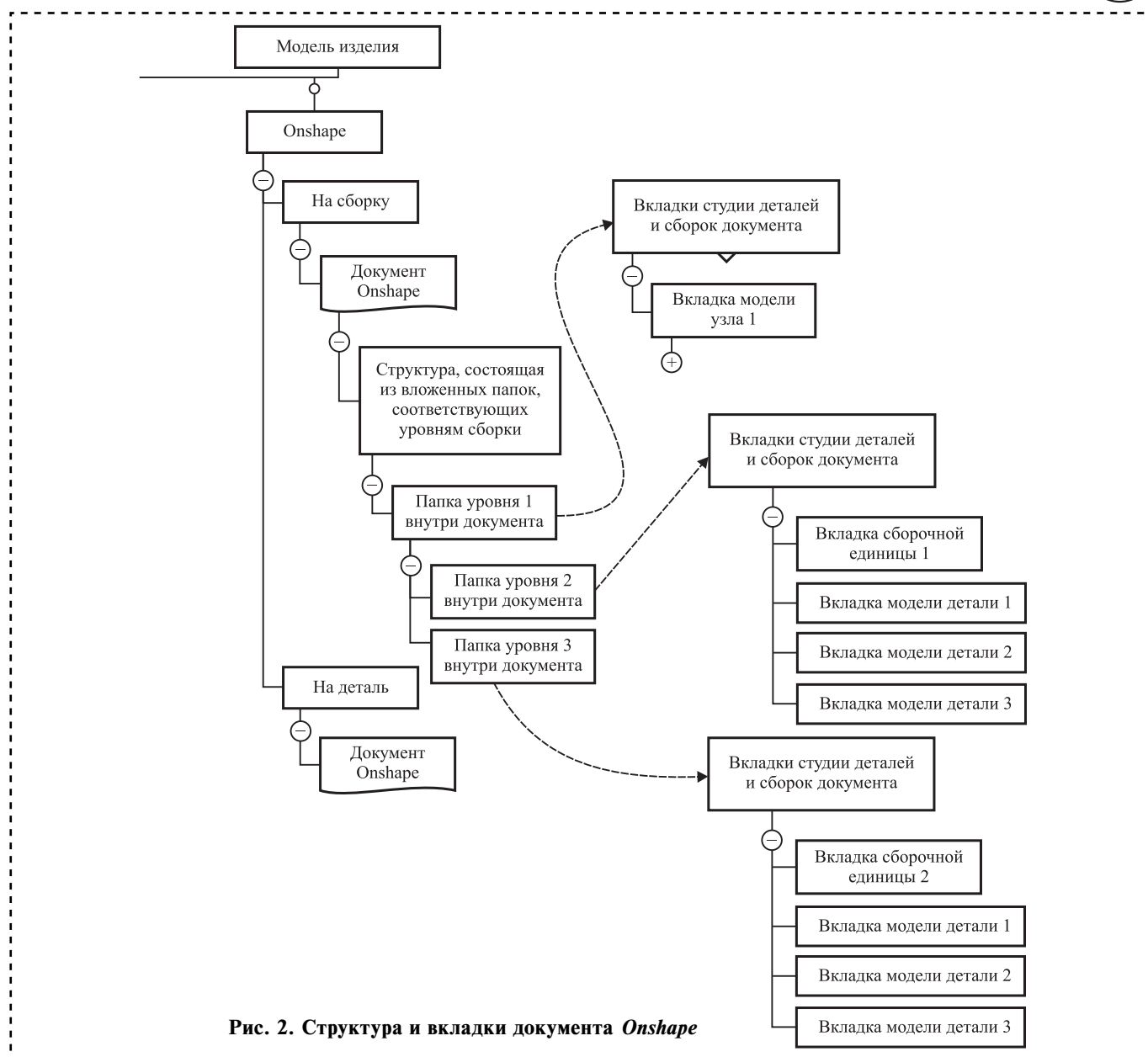


Рис. 2. Структура и вкладки документа *Onshape*

### Разработка структуры документа *Onshape* большой сборки

Создание иерархии папок облегчает разработчикам проекта совместное редактирование большой сборки и позволяет:

- разбить данные документа по уровням (папкам);
- более оптимально проектировать большую сборку за счет разбиения сложной задачи на более простые;
- манипулировать своей частью конструкции каждому разработчику, не мешая другим работающим с этим документом параллельно;

— распределить сборочные единицы и под-сборки, из которых состоит большая сборка, между пользователями.

Процесс создания большой сборки группой пользователей (рис. 3) включает следующие этапы:

- открытие (создание) документ проекта;
- создание иерархии папок сборочных единиц в составе иерархии папок большой сборки;
- импортирование моделей деталей в соответствующие папки документа заданной сборочной единицы;
- создание модели сборки сборочной единицы, используя модели деталей и сборок окружения;

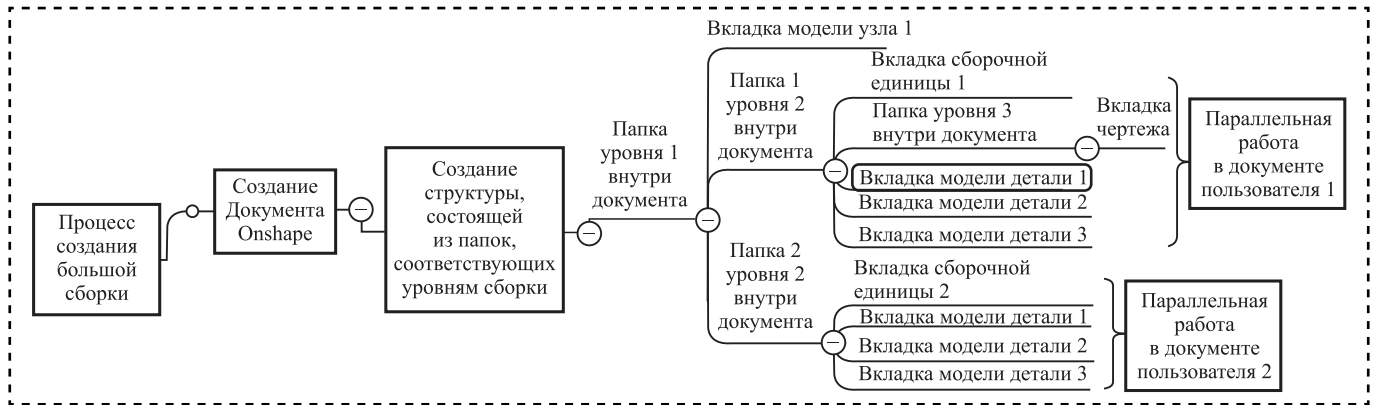


Рис. 3. Процесс создания большой сборки

— добавление в основную сборку (на вкладку старшего уровня сборки) сборочных узлов, разработанных на отдельных вкладках одного документа разными пользователями.

Разработчики могут выполнять моделирование однотипных изделий одним способом, что позволяет создать устойчивую среду для изменения пользователями. То есть можно клонировать в *Onshape* документ со структурой подходящего типа и использовать его в качестве шаблона структуры данных для проектирования новых однотипных изделий.

Приведем в качестве примера коллективной сборки сборку двигателя и коробки передач (рис. 4 на стр. 3 обложки). Цветом на рис. 4 выделены сборочные единицы, которые разрабатываются пользователями в качестве заданий.

Исходные данные для создания структуры документа *Onshape* — названия сборочных единиц (узлов) и подборок, иерархические связи, взятые из структуры изделия.

На начальном этапе необходимо представить большую сборку в виде иерархической структуры изделия.

В начале имеется приблизительное представление о входимости в изделие сборочных единиц и их первоначальные названия, затем названия сборочных единиц и подборок уточняют.

Далее следует перенос компонентов изделия из исходной структуры в иерархическую структуру папок документа *Onshape* (рис. 5 на стр. 3 обложки).

Еще одной проблемой, которую необходимо решать при коллективной разработке сборочных моделей большой сборки — возникновение циклических взаимосвязей в сборке.

Циклическая взаимосвязь приводит к ошибке, не позволяющей найти решение при рестраивании модели. В общем случае это использование ограничений, противоречащих

уже ранее заданным. В сборке нельзя ограничить перемещение компонента в пределах одной степени свободы более чем одним способом. Например, ранее было задано сопряжение граней, фиксирующих деталь 2 относительно детали 1, позднее задано сопряжение с деталью 3, которое должно оторвать деталь 2 от детали 1, и получена ошибка. В какой-то мере гарантировать отсутствие циклических сборочных связей и контролировать сборочные связи может только один пользователь в пределах своей под сборки.

Ошибки — результат выявления циклических связей, особенно характерны для больших сборок, разрабатываемых коллективно. Из-за них сборочная модель не может быть решена, что часто заставляет разработчиков "ломать сборку" волевым образом.

Проблема контроля над состоянием компонентов и сборочных связей, совместно используемых двумя или более под сборками, еще ждет своего решения. Тем не менее существует ряд подходов, снимающих остроту указанной проблемы (рис. 6) [4].

Указанные подходы позволяют значительно снизить ошибки, если не исключить полностью, за счет исключения сборочных взаимосвязей между отдельными крупными сборочными единицами, разрабатываемыми разными пользователями, что существенно повышает скорость работы со сборками.

### Моделирование с общим началом координат с использованием каркаса

В ряде случаев (например, при проектировании планировок) можно заранее спланировать размещение, например, — расположение станков в цехе, относительно некоторой базы — мировой системы координат. В данном случае предполагается, что у станков есть своя модельная система координат, но рас-



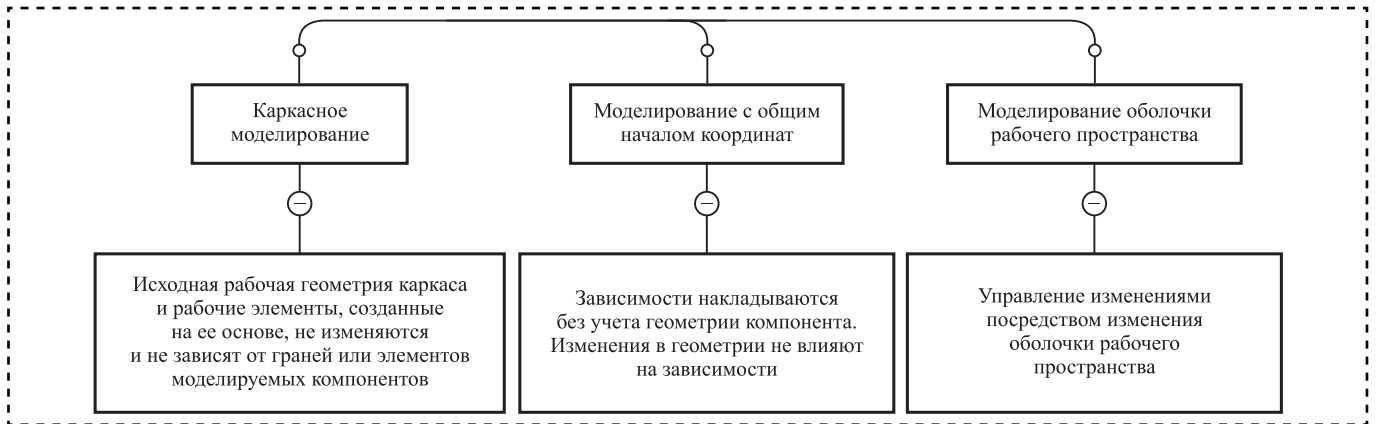


Рис. 6. Подходы к моделированию больших сборок

положение всех модельных систем координат определено в пространстве за счет привязки модельных систем координат к мировой системе координат. Роль общего начала большой сборки аналогична мировой системе координат при создании планировок, — определять расположение модельных систем координат сборочных единиц в пространстве и друг относительно друга и внутри большой сборки.

В модельном пространстве каждой детали или сборки всегда автоматически создается своя система(ы) координат и нулевая точка, относительно которой задаются элементы модели и расположения компонентов и пересчитываются их размеры.

Общее начало в нашей реализации — это тоже нулевая точка модельного пространства на вкладке модели большой сборки, где осуществляется финальная сборка сборочных единиц, разработанных разными пользователями, в изделие.

"Скелет" или каркас сборки состоит из эскизов на плоскостях и создается в контексте сборки изделия. При моделировании "скелета" в контексте заимствуется общее начало — нулевая точка изделия. Каркас состоит из эскизов, состоящих из элементов вспомогательной геометрии, размеров, справочных плоскостей (рис. 7).

Принципиально важно, что компоненты сборок разных пользователей взаимодействуют только с каркасом, а не между собой.

Взаимодействие с каркасом осуществляется вставкой в модель сборочной единицы пользователя одного эскиза, составляющего "скелет". Чтобы пользователь знал, какой эскиз "скелета" ему нужен для привязки своей модели, у эскиза должно быть имя и известное пользователю расположение в папке внутри документа.

Коллективная работа предполагает определенные ограничения по работе с каркасом.

Руководитель проекта может вносить изменения в каркас, но это происходит в начале, когда выполняется распределение между пользователями задач проектирования компонентов большой сборки. Разработчики сборочных единиц только используют каркас для привязки своих сборок, не меняя его.

Таким образом, каркас представляет собой пространственную базу расположений компонентов изделия — источник основных размеров, связывающих компоненты сборки.

Коллективная разработка в *Onshape* большой сборки двигателя и коробки передач (см. рис. 4) реализует сразу два подхода "Каркасное моделирование" и "Моделирование с общим началом координат".

Этапы реализации авторской методики моделирования большой сборки (рис. 8):

- создание общего начала;

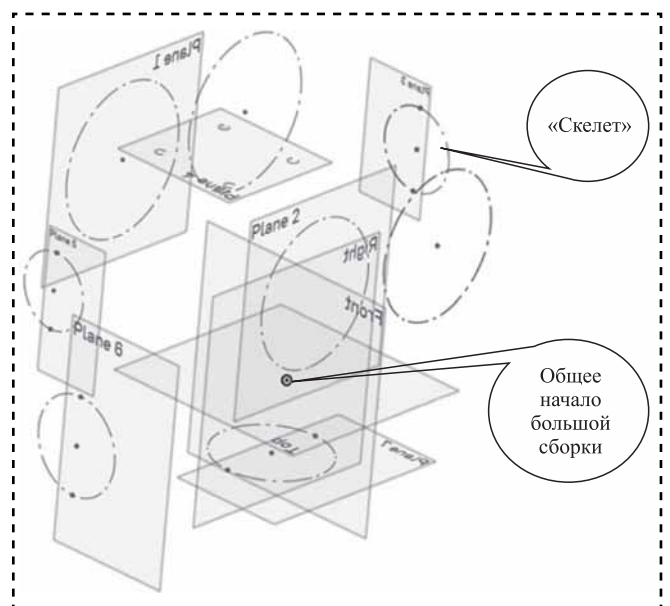
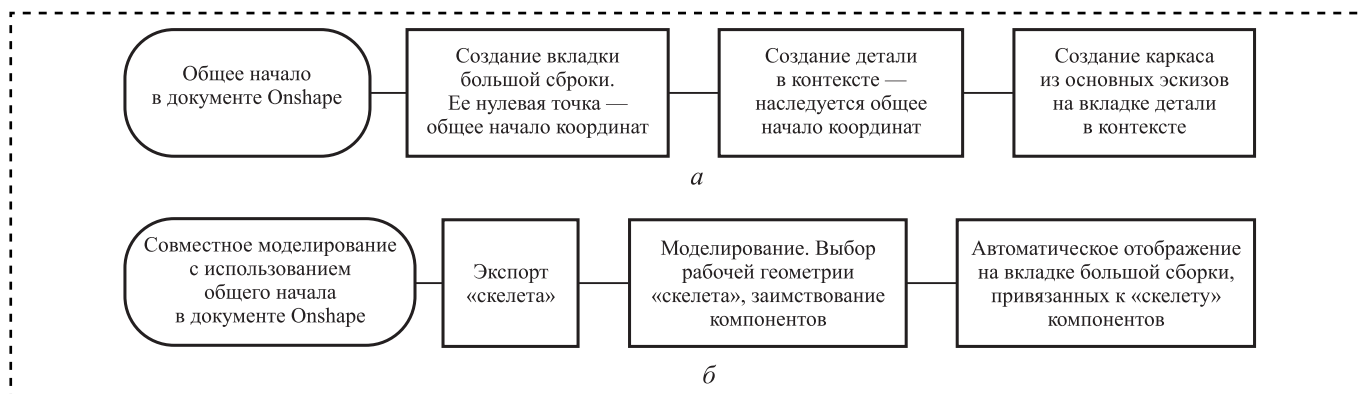


Рис. 7. "Скелет" с общим началом координат



**Рис. 8. Схема моделирования:**

*a* — с общим началом координат; *б* — с использованием "скелета" (каркаса)

— создание вкладки большой сборки (ее нулевая точка — общее начало);

— создание детали в контексте (на вкладке наследуется общее начало координат);

— создание каркаса из основных эскизов на вкладке детали в контексте;

— совместное моделирование с использованием общего начала в документе;

— экспорт "скелета" (ссылки на вкладку) в подборку;

— моделирование (выбор рабочей геометрии "скелета", заимствование компонентов);

— автоматическое отображение на вкладке большой сборки привязанных к "скелету" компонентов.

Привязка к большой сборке импортированной детали при каркасном моделировании не содержит ничего принципиально нового, и в то же время сопряжение с геометрией эскиза скелета привязывает деталь к общему началу большой сборки автоматически (рис. 9 на стр. 3 обложки).

### Моделирование оболочки рабочего пространства

Многие сборочные единицы сборки могут быть ограничены в своих габаритах относительно простыми по форме геометрическими телами — параллелепипедами, цилиндрами, сферами и т.п. Тогда возможно создать указанные оболочки на предварительном этапе, а конкретные модели компонентов сборки изделия размещать в пределах оболочек-контейнеров.

При моделировании большой сборки не учтен подход моделирования оболочки рабочего пространства, так как не проектировали какую-то новую конструкцию, а воспроизвели уже существующую. То есть вопрос распределения пространства между сборочными единицами не стоял.

### Заключение

В *Onshape* "работают" подходы моделирования больших сборок, используемые в настольных САПР.

Имеются особенности, связанные с переносом решения задач, традиционно решаемых с помощью PDM в облачную среду: создание структуры и работа с версиями документа большой сборки.

Для максимально эффективного использования облачных САПР при работе с большими сборками необходима специальная подготовка пользователей, включающая:

— решение задач структурного анализа сборки изделия, чтобы создать структуру документа;

— нахождение зависимостей между деталями и сборками и выявление стационарных связей, которые позволяют создать "скелет";

— моделирование деталей и подборок на основе исходной рабочей геометрии эскизов "скелета".

Предложенные методические рекомендации могут быть использованы инженерами при проектировании сложных изделий и коллективном моделировании больших сборок в облачной САПР.

### Библиографический список

1. **Пять** советов по эффективной работе с большими сборками [Электронный ресурс]. URL: [https://www.Solid-Edge-Five-tips-for-large-assembly-performance-63817\\_tcm52-9087](https://www.Solid-Edge-Five-tips-for-large-assembly-performance-63817_tcm52-9087) (дата обращения: 16.01.2020).

2. **Randall Newton**. Onshape offers a new paradigm for CAD collaboration CAD/CAM/CAE, Observer #3 (95)/2015 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cadalyst.com/cad/product-design/onshape-offers-new-paradigm-cad-collaboration-23291?page\\_id=1](https://www.cadalyst.com/cad/product-design/onshape-offers-new-paradigm-cad-collaboration-23291?page_id=1) (дата обращения: 16.01.2020).

3. **Обзор** популярных систем автоматизированного проектирования (CAD) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pointcad.ru/novosti/obzor-sistem-avtomatizirovannogo-proektirovaniya> (дата обращения: 16.01.2020).

4. **Методы** моделирования в Inventor [Электронный ресурс]. URL: <http://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2016/RUS/?guid=GUID-C68767BC-9398-4D2A-8DF5-B87184E396B3> (дата обращения: 16.01.2020).

**О.И. Борискин**, д-р техн. наук, **М.А. Анисимова**, канд. техн. наук  
(Тулский государственный университет "ТулГУ"),

**Г.А. Нуждин**, канд. техн. наук

(Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва)

E-mail: nuzhdin.65@mail.ru

## Подготовка специалистов по метрологии в машиностроении

*В целях выполнения требований по управлению качеством машиностроительной продукции и метрологическому обеспечению на предприятии проанализировали действующие стандарты на предмет подтверждения согласованности требований. Для анализа отобраны федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования двух уровней (бакалавриат и специалитет) профиля машиностроение (обеспечение единства измерений (ГСОЕИ) и профессиональный стандарт специалиста по метрологии). Полученные результаты использованы при внедрении курсовых работ. Рекомендовано освещение вопросов, связанных с измерительными приборами и устройствами автоматического контроля в смежных дисциплинах, и включение в них темы "Основные направления деятельности в области метрологического обеспечения предприятия".*

*In order to meet the requirements for quality management of machine-building products and metrological support, the company analyzed the existing standards for confirming the consistency of requirements. Federal state educational standards of higher education of two levels (bachelor's degree and specialty) of the mechanical engineering profile (ensuring the unity of measurements (GSEEI) and the professional standard of a metro specialist) were selected for the analysis. The obtained results are used in the implementation of term papers. It is recommended to cover issues related to measuring devices and automatic control devices in related disciplines, and to include the topic "Main areas of activity in the field of metrological support of the enterprise".*

**Ключевые слова:** машиностроение, метрологическое обеспечение, образовательный стандарт высшего образования, национальный стандарт, профессиональный стандарт, курсовая работа.

**Keywords:** machine building, metrological support, educational standard of the higher education, national standard, professional standard, course work.

### Введение

Управление качеством продукции решает задачи и проблемы гармоничного комплексного развития производства товаров и услуг на базе современных методов управления и контроля деятельности предприятий и организаций, информационных технологий, стандартов, методов общего управления качеством, охраны окружающей среды и перспективных инновационных технологий. Его содержанием в числе прочего является повышение безопасности и конкурентоспособности продукции и услуг, включая машиностроение и приборостроение, метрологическое обеспечение и разработку путей повышения результативности

всех составляющих — прибыльность, производительность, условия трудовой деятельности, подготовка специалистов на основе принципа сквозного интегрированного управления качеством [1].

По характеру объекта принято выделять метрологическое обеспечение в процессе, например, сборочного производства. Характер объекта вместе со сферой деятельности определяет перечень задач по метрологическому обеспечению объекта, существующих приемов их решения и обуславливает набор элементов метрологического обеспечения измерений, а также состав критериев и методологию оценки уровня метрологического обеспечения объекта [2].



В современном сборочном машиностроительном производстве применяют сложные агрегаты и технологии. Особенности технологии машиностроения и используемых процессов требуют компетентных исполнителей, которые смогут обеспечить качество выпускаемой продукции. В настоящее время существуют нерешенные вопросы подготовки кадров с высшим образованием для машиностроительного и металлургического производства [3]. Компетентный персонал должен обладать знаниями в области технологии машиностроения и рационального подхода к использованию технической базы машиностроительных предприятий. Также без практических навыков проведения работ сложно решать профессиональные задачи. В совокупности эти знания и навыки должны обеспечивать как применение теоретических и математических моделей, позволяющих прогнозировать качество, свойства и работоспособность материалов, заготовок и изделий, так и применение перспективных технологических процессов и методов повышения надежности деталей [4–7].

Поэтому в целях выполнения требований по управлению качеством машиностроительной продукции, метрологическому обеспечению и требуемой надежности на таком предприятии поставлена задача: *подтвердить согласованность требований действующих стандартов и выработать рекомендации по управлению качеством машиностроительной продукции в части подготовки специалистов по метрологии.*

### Исследования и полученные результаты

Приказом Минобрнауки России от 03.09.2015 № 957 утвержден федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение (уровень бакалавриата). Направленность, профиль и специализация этой программы включают технологии: сварочного и литейного производства, высокоэффективных процессов обработки материалов в любом типе образовательной программы: академическом или прикладном бакалавриате. Из требований ФГОС ВО вытекает, что выпускник, освоивший программу бакалавриата по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение, должен быть

готов решать в том числе следующие профессиональные задачи: проведение технических измерений; организация метрологического обеспечения технологических процессов, диагностика средств измерения, составление программ испытаний; подготовка документации для системы менеджмента качества; проведение оценки соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам.

Приказом Минобрнауки России от 28.10.2016 № 1343 утвержден ФГОС ВО по специальности 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов (уровень специалитета). Специализации, по которым готовят выпускников, освоивших программу специалитета, включают проектирование технологических комплексов в машиностроении, механосборочных, сварочных, литейных производств и др. Выпускник, освоивший программу специалитета 15.05.01, должен быть готов решать в том числе следующие профессиональные задачи: выполнение работ по стандартизации; подготовка технической документации по менеджменту качества; составление программ испытаний и испытания; проведение контроля соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам.

Все вместе эти требования хорошо вписываются в функционирование системы метрологического обеспечения измерений [2]. Проведенный анализ показал, что лица, имеющие такое высшее образование (бакалавриат или специалитет), в целом соответствуют минимальным требованиям к экспертам и специалистам для участия в проведении работ по метрологическому обеспечению, или испытаниям и сертификации, или судебной металловедческой экспертизы [4, 8–10]. Подобные требования изложены в девятом разделе ГОСТ Р 56069–2018 [8]. Для обеспечения эффективной деятельности поверители должны обладать следующими личными качествами:

— объективностью, принципиальностью, ответственностью наряду со сдержанностью, доброжелательностью, коммуникабельностью и умением тактично взаимодействовать с людьми;

— умением анализировать, логически обосновывать и аргументированно отстаивать

свои выводы; способностью принимать правильные решения на основании полученных объективных данных и четко выражать свои мысли в устной и письменной форме.

Поверитель должен принять на себя следующие обязательства:

- проводить поверку средств измерений (СИ) в строгом соответствии с нормативным документом по методике (методу) поверки этого средства без каких-либо отступлений или упрощений;

- быть независимым и не поддаваться давлению в отношении внесения изменений в документацию о результатах поверки СИ, если эти изменения не основаны на объективных данных; а также воздерживаться от действий, которые могли бы дискредитировать систему отечественной метрологии.

С другой стороны, профессиональный стандарт "специалист по метрологии" регламентирует в функциональной карте вида профессиональной деятельности обобщенную трудовую функцию, которая включает ряд трудовых функций, перекликающихся с требованиями ФГОС ВО к проектно-конструкторской, производственно-технологической и организационно-управленческой деятельности совместно с требованиями профстандартов, соответствующих профессиональной деятельности выпускников [11].

В целях решения поставленной задачи разработана, апробирована и внедрена курсовая работа по дисциплине "Методы и средства измерений и контроля". Темой такой курсовой работы может быть, например, "Разработка приспособления для контроля радиального биения вала относительно оси центров". Курсовая работа состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка содержит описание заданной детали, ее параметров, требующих контроля, а также способов и средств их контроля в цеховых условиях. Для рассматриваемой темы проводят расчет размеров калибра-скобы для контроля вала, а также проектируют калибр-призму для контроля шпоночного паза, и описывают конструкцию спроектированного приспособления.

Пусть контролируемая деталь представляет собой ступенчатый вал, изготовленный из углеродистой стали 45 (ГОСТ 1050—2013). Вал имеет три шейки диаметрами 35, 40 и 35 мм, а также шлицы (рис. 1). Шейка диаметром 35 мм имеет шпоночный паз. Так как предполагается, что контроль параметров детали осуществляется в цеховых условиях, то выбор метода и средств измерения обязательно учитывает все эти условия (таблица).

Для рассматриваемой детали в цеховых условиях удобнее и проще осуществлять качественный контроль шероховатости поверхностей.

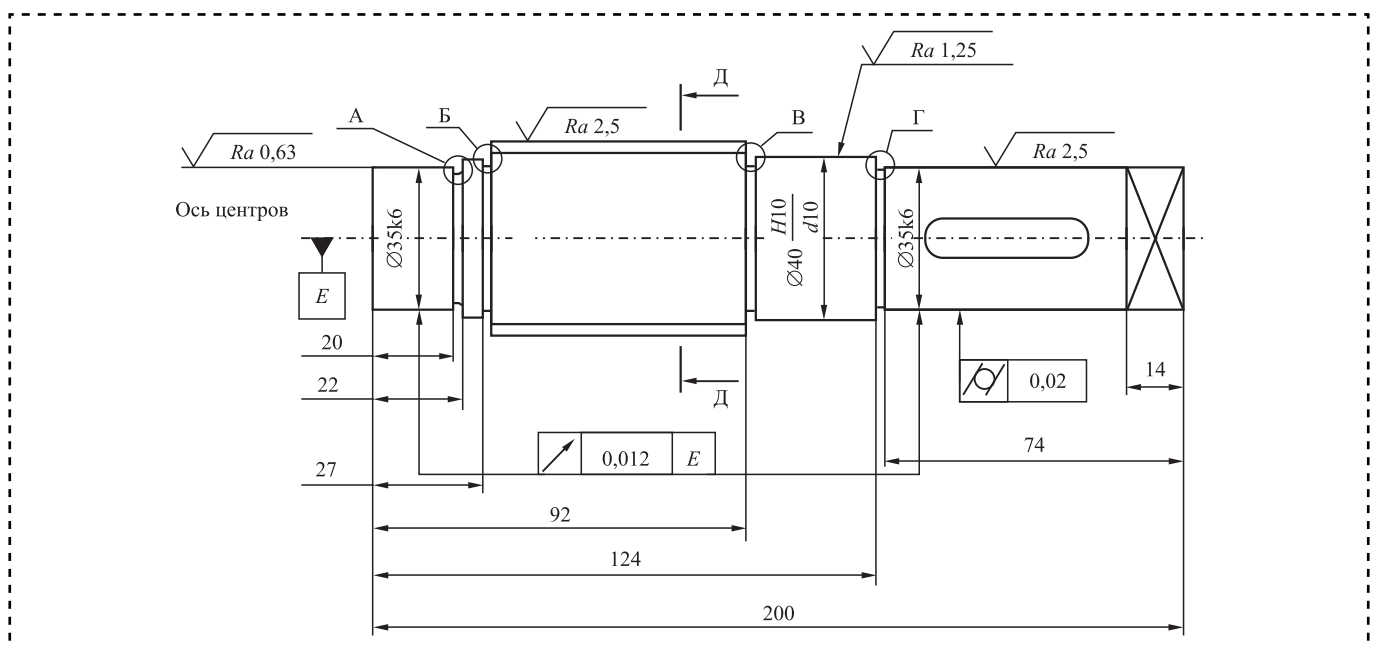


Рис. 1. Вал

**Контролируемые параметры по рис. 1**

Параметры	Специальные СИ	Универсальные СИ
<i>Линейные размеры</i>		
Длина: 20 22 27 74 92 124 200	Калибр-скоба	Штангенциркуль
Диаметр: 35 40 35		
<i>Параметры поверхности</i>		
Параметр $Ra$ : 0,63 2,5 1,25	Профилограф-профилометр	Микроскоп МИС-11
Твердость	Твердомер	—
Отклонение от цилиндричности	Кругломер	—
Радиальное биение	Индикатор часового типа	—

Например, методом сравнения контролируемой поверхности с образцами шероховатости поверхности или образцовыми деталями. Сравнение происходит визуальным путем или на ощупь. Образцы шероховатости изготавливают в соответствии с ГОСТ 9378—93. Каждый образец должен иметь маркировку с указанием параметра  $Ra$  и метода воздействия на поверхностный слой материала (шлифовка, точение, фрезерование и т.д.).

При измерении отклонений от цилиндричности проводят измерение круглости в начале, середине и в конце нормируемого участка, а затем измеряют отклонения профиля продольного сечения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. За отклонение от цилиндричности принимают наибольший из полученных результатов измерений.

Радиальное биение поверхностей как разность наибольшего и наименьшего расстояний от точек реального профиля поверхности вращения до базовой оси в сечении плоскостью, перпендикулярной к базовой оси, является результатом совместного проявления отклонения от круглости профиля рассматриваемого сечения

и отклонения его центра относительно базовой оси. Оно характеризует в частности смещение центров тяжести зубчатых колес, муфт, шкивов и других быстровращающихся деталей относительно осей их базовых отверстий, которое приводит к возникновению дополнительных динамических нагрузок и преждевременному выходу из строя работающих механизмов.

Для выполнения операций технического контроля в производственных условиях используют контрольные инструменты в виде калибров, предназначенных для проверки соответствия размеров изделий или их конфигурации установленным допускам. Калибры применяют чаще для определения годности деталей с точностью 6...18-го квалитетов, а также в устройствах активного контроля, работающих по принципу "западающего калибра".

Распространенные предельные калибры — калибры-скобы для контроля гладких валов (рис. 2). Различают калибры однопредельные (с проходной или непроходной стороной) и двупредельные (сочетающие проходную и непроходную стороны). Среди двупредельных калибров различают односторонние (проходная и непроходная стороны последовательно расположены друг за другом на одном конце калибра) и двусторонние (проходная и непроходная стороны расположены на противоположных сторонах калибра). Регулируемые калибры-скобы позволяют перенастраивать свой размер для контроля нескольких отличных предельных размеров или же для компенсации износа измерительных поверхностей скобы. К калибрам предъявляют ряд метрологических, конструктивных, технологических и эксплуатационных требований. Метрологические требо-


**Рис. 2. Калибр-скоба**

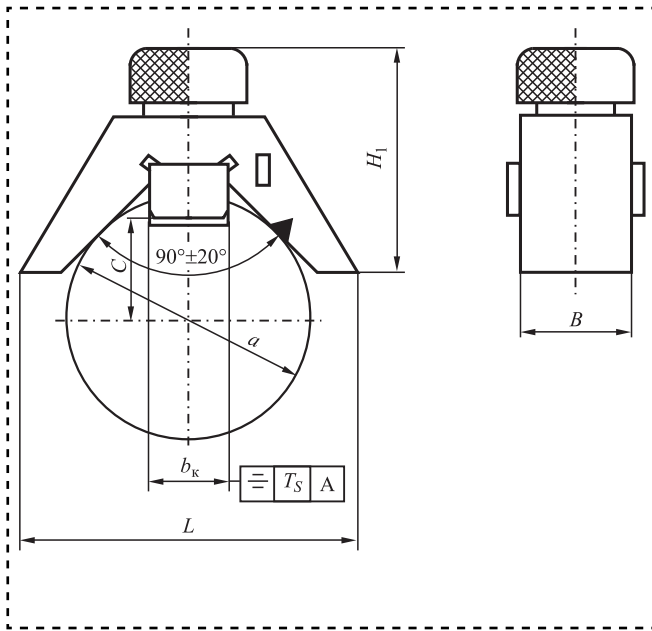


Рис. 3. Шпоночный калибр-призма

вания сводятся к соблюдению принципа Тейлора, согласно которому калибр ПР должен быть по возможности полным, а НЕ, наоборот, должен иметь точечный контакт с контролируемой деталью. Для калибров-скоб важно сочетание минимальной массы с максимальной жесткостью.

Шпоночный калибр-призму применяют для контроля валов со шпоночным пазом (рис. 3). Вал со шпоночным пазом считается годным, если шпоночный калибр-призма при отсутствии зазора между валом и призмой проходит, а диаметр вала, ширина и глубина шпоночного паза не выходят за установленные предельные размеры. Для контроля отклонений от симметричности шпоночного паза вала относительно оси используют калибр с призмой и стержнем. При наложении призмы на вал стержень должен заходить в шпоночный паз. Если стержень упирается в кромки паза, то это означает, что действительное смещение паза превышает допустимое. Шпоночный проходной калибр-призму характеризуют два размера: толщина контрольной шпонки  $b_k$  и глубина  $C$  вхождения шпоночного калибра-призмы в шпоночный паз вала.

В расчете калибра-скобы для контроля рассматриваемого в курсовой работе вала  $\varnothing 35k6$  принимают отклонения по ГОСТ 25347—2013, допуски и отклонения калибра по ГОСТ 24853—81. Калибр-призму для контроля шпоночного паза проектируют в соответствии с требованиями

ГОСТ 24114—80. Исполнительные размеры  $b$  и допуск  $T$  принимают по ГОСТ 24109—80, резьбу гайки устанавливают по ГОСТ 16093—2004.

В качестве измерительной головки для контроля радиального биения целесообразно применять в проектируемом приспособлении индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм (ГОСТ 577—68) с перемещением измерительного стержня параллельно шкале, предназначенный для относительных измерений наружных размеров, отклонений формы и расположения поверхностей (рис. 4).

По мере выполнения курсовой работы совершенствуются одни части компетенций обучающегося при параллельном формировании других [12]:

- осуществлять экспертизу и контроль СИ и оборудования, определять причины существующих недостатков и неисправностей в его работе и принимать меры по их устранению;

- участвовать в разработке планов, программ и методик выполнения измерений и контроля, инструкций по эксплуатации оборудования и др., входящих в состав конструкторской и технологической документации.

При внедрении курсовой работы для разных категорий слушателей в рабочих программах смежных дисциплин целесообразно освещение вопросов, связанных с измерительными приборами и устройствами автоматического контроля, и включение темы "Основные направления деятельности в области метрологического обеспечения предприятия" [3]. Рекомендуется в ходе защиты курсовой работы предложить обучающемуся ответить на устные вопросы по теме в целях выявления теоретической и прак-

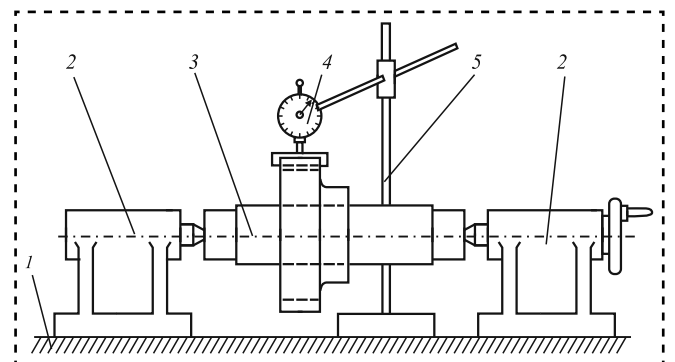


Рис. 4. Вариант метрологической схемы проектируемого контрольного приспособления:

1 — основание; 2 — стойки с центрами; 3 — деталь для контроля (ступенчатый вал); 4 — индикатор; 5 — стойка с индикатором



тической подготовки будущего бакалавра или специалиста по метрологическому обеспечению производственной деятельности в соответствии с содержанием образовательной программы. Удовлетворительные ответы уже на два вопроса практически полностью определяют получение отличной оценки.

### Заключение

В результате проведенного анализа действующих стандартов высшего образования по направлению подготовки "Машиностроение", профессионального стандарта "Специалиста по метрологии" и национальных стандартов РФ в сфере государственной системы обеспечения единства измерений подтверждена согласованность установленных требований в части метрологии. Внедрение курсовой работы с рассмотрением основных параметров заданной детали, описанием способов и средств контроля этих параметров в производственных условиях повысит результативность освоения программы бакалавриата по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение и специалитета по направлению 15.05.01.

### Библиографический список

1. **Высшая** Аттестационная Комиссия. Паспорта научных специальностей. [Электронный ресурс]. URL: <http://vak.ed.gov.ru/316>
2. **ГОСТ Р 8.820—2013**. ГСОЕИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
3. **Борискин О.И., Ларин С.Н., Анисимова М.А., Нуждин Г.А.** Подготовка специалистов по метрологии в металлургии // Черные металлы. 2019. № 12. С. 70—74.

4. **The Conformity Assessment of Metamaterials Quality Management / Boriskin O.I., Nuzhdin G.A., Khunuzidi E.I., Blagoveshchenskiy D.I.** // CIS Iron and Steel Review. 2019. V. 17. С. 53—57.

5. **Митин О.Н., Нуждин Г.А., Нгуен К.Х.** Моделирование операции обжима с утонением толсто-стенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып. 5. С. 57—65.

6. **Ларин С.Н., Нуждин Г.А., Платонов В.И.** Подход к разработке математической модели изотермического свободного деформирования листовой заготовки из анизотропного материала в квадратную матрицу в режиме ползучести // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2018. Вып. 1. С. 197—202.

7. **Thin-walled steel billets production quality management // O.I. Boriskin et al.** // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2019. V. 54. № 6. P. 1305—1311.

8. **ГОСТ Р 56069—2018**. Требования к экспертам и специалистам. Поверитель средств измерений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.

9. **Microstructure characterization of Fe—21Cr—15Ni—Nb—V non-magnetic austenitic stainless steel during hot deformation / Y.L. Song, C.S. Li, B.Z. Li, Y.H. Han** // Materials Science and Technology. 2018. V. 34. No. 14. P. 1639—1648.

10. **Донцова И.И., Касьянова И.А., Мокроусов А.А., Питрюк В.А.** Экспертное исследование металлов и сплавов // Типовые экспертные методики исследования вещественных доказательств. Ч. II / под ред. А.Ю. Семенова; общая редакция В.В. Мартынова. М.: ЭКЦ МВД России, 2012. С. 656—664.

11. **Приказ** Минтруда от 29.06.2017 № 526н "Об утверждении профессионального стандарта "Специалист по метрологии". Зарегистрировано в Минюсте России 24.07.2017 № 47507.

12. **ООП ВПО** по направлению 27.03.01 "Стандартизация и метрология". ФГБОУ ВПО "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный". Утв. Ученым советом 20.12.2013, прот. № 5.

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 06.02.2020. Подписано в печать 07.04.2020. 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.