

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  
8 (241)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Современные технологии сборки

- Вартанов М.В., Петров В.К., Трошина О.В. Повышение надежности роботизированной сборки на основе оптимизации схем базирования . . . . . 339  
Иванов А.А., Кретинин О.В. Сборка металлокерамических корпусов интегральных микросхем . . . . . 344

#### Технологическая оснастка для сборки

- Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросов А.Е. Высокоточный многошпindelный гайковерт для автоматизированного обеспечения герметичности стыков при сборке изделий, работающих при повышенных давлениях . . . . . 348  
Шуваев В.Г., Крылова И.Н. Обеспечение качественной затяжки резьбовых соединений по динамическим критериям . . . . . 352

#### Экология и безопасность сборочных работ

- Брысин А.Н., Микаева А.С., Микаева С.А., Ларшина Э.Л. Сборка медицинского рециркулятора . . . . . 355

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

- Бардушкин В.В., Кочетыгов А.А., Шилиева Ю.И., Воловникова О.В. Прогнозирование значений средних напряжений при фазовом переходе лед—вода в мезопористых структурах на основе кремния в интервале температур 233...273 К . . . . . 362  
Бойко М.В., Колесников И.В., Ермаков С.Ф., Бойко Т.Г., Бичеров А.А. Формирование граничных смазывающих пленок в присутствии комплексобразующих присадок . . . . . 367

#### В помощь конструктору, технологу

- Воробьев Е.И., Моргуненко К.О., Конева Е.Е. Построение движений манипуляторов в двуруких робототехнических системах в сборке цилиндрических соединений . . . . . 372  
Кочергин В.С., Куц В.В., Разумов М.С. Методика определения минимально допустимого и максимально возможного подъема на зуб при проектировании протяжек для обработки гранных отверстий со стороны более 60 мм . . . . . 376  
Родионова Е.Н., Ямников А.С., Матвеев И.А. Размерные цепи обеспечения входимости сборного осесимметричного корпуса в направляющее отверстие . . . . . 380

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.

##### КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

##### НИЖНИЙ НОВГОРОД

- С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

##### ОРЕЛ

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

##### ОРЕНБУРГ

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

##### ПЕРМЬ

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

##### РОСТОВ-НА-ДОНУ

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

##### 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  
8 (241)

### CONTENTS

#### Modern technologies in assembly

- Vartanov M.V., Petrov V.K., Troshina O.V. Improving the reliability of robotic assembly based on optimization of locating charts . . . . . 339  
Ivanov A.A., Kretinin O.V. Assembly of metal-ceramic cases integrated circuit . . . . . 344

#### Technological equipment for assembly

- Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Matrosov A.E. High precision multi-spindle wrench for automated sealing of joints during assembly of products operating at high pressures . . . . . 348  
Shuvaev V.G., Krylova I.A. Ensuring high-quality tightening of threaded connections according to dynamic criteria . . . . . 352

#### Ecology and safety in assembly

- Brysin A.N., Mikaeva A.S., Mikaeva S.A., Larshina E.L. Assembling a medical recirculator . . . . . 355

#### Friction & lubrication in machines and mechanisms

- Bardushkin V.V., Kochetygov A.A., Shilyaeva Yu.I., Volovlikova O.V. Predicting the values of average stresses during the ice-water phase transition in mesoporous silicon-based structures in the temperature range 233...273 K . . . . . 362  
Boiko M.V., Kolesnikov I.V., Ermakov S.F., Boiko T.G., Bicherov A.A. Formation of boundary lubricating films in the presence of complexing additives . . . . . 367

#### Industrial and design engineer's aid

- Vorobyov E.I., Morgunenko K.O., Koneva E.E. Construction of manipulator movements in two-handed robotic systems when assembling of cylindrical joints . 372  
Kochergin V.S., Kuts V.V., Razumov M.S. The methodology for determining the minimum allowable and maximum possible tooth lift when designing broaches for processing face holes with a side of more than 60 mm . . . . . 376  
Rodionova E.N., Yamnikov A.S., Matveev I.A. Dimensional chains for ensuring that the assembled axisymmetric housing is inserted into the guide hole . . . . . 380

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

#### Editors

##### MOSCOW

A.S. VASIL'EV  
(Chief editor)  
V.V. BARDUSHKIN  
I.A. BUYANOVSKY  
M.V. VARTANOV  
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. OSETROV  
B.A. YAKIMOVICH

##### KAZAN

R.I. ADGAMOV

##### KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN  
A.M. SHPILEV

##### NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

##### OREL

Yu.S. STEPANOV  
G.A. KHARLAMOV

##### ORENBURG

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

##### PERM

S.M. BELOBORODOV  
V.F. MAKAROV

##### ROSTOV-ON-DON

A.A. RYZHKIN  
I.V. KOLESNIKOV  
A.P. SYCHEV

##### RYBINSK

V.F. BEZIAZYCHNYI  
V.V. NEPOMILUEV  
A.N. SEMENOV

##### SAMARA

Yu.A. VASHUKOV  
M.A. EVDOKIMOV

##### ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBAEV

##### TOMSK

A.V. KOLUBAEV  
V.E. PANIN

##### TULA

A.A. MALIKOV  
V.V. PREYS

##### KHABAROVSK

V.I. SCHPORT

#### Belarus

##### MINSK

V.L. BASINJUK  
M.L. KHEIFETZ

##### GOMEL

V.E. STARZHINSKI

#### Ukraine

##### KIEV

A.S. ZENKIN  
V.A. MATVIENKO

##### DONETSK

A.N. MIKHAILOV

#### Poland

P. LEBKOVSKI  
E. LUNARSKI

#### 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

**М.В. Вартанов**, д-р техн. наук, **В.К. Петров**, канд. техн. наук  
(Московский политехнический университет),  
**О.В. Трошина** (АО "ЭСДИАЙ СОЛЮШЕН")  
E-mail: m.v.vartanov@mospolytech.ru

## Повышение надежности роботизированной сборки на основе оптимизации схем базирования

*Представлено сравнение схем с пассивной адаптацией и жестким базированием при роботизированной сборке цилиндрических деталей типа "вал—втулка". Сопоставлены результаты физического эксперимента и аналитического решения задачи с использованием оригинальной модели роботизированной сборки в квазистатической постановке. Определены реакции в точках контакта, которые возникают в процессе сопряжения.*

*A comparison of locating charts with passive adaptation and hard basing for robotic assembly of cylindrical parts of the "shaft—bushing" type is presented. The results of a physical experiment and an analytical solution to the problem using the original models of the robotic assembly in a quasistatic setting are compared. The reactions at the contact points that occur during the coupling process are determined.*

**Ключевые слова:** роботизированная сборка, соединение с зазором, плавающее базирование, жесткое базирование.

**Keyword:** robotic assembly, open joint, floating basing, hard basing.

### Введение

Основная техническая задача автоматической сборки — обеспечение условий собираемости [1]. Главная проблема при сборке — смещение деталей, вследствие чего возникает вероятность заклинивания. Избежать этого можно применением схем свободного и упругого базирования деталей.

В ряде работ рассмотрены способы упругого базирования применительно к различным соединениям: резьбовым, цилиндрическим, профильным [1—3]. Разработан ряд технических средств относительной ориентации деталей при автоматической сборке.

Широко используются ультразвуковые и низкочастотные колебания в роботизированных сборочных процессах для цилиндрических и фасонных валов при автоматической сборке соединений с натягом [3—5]. Доказана эффективность использования сферической опоры для запрессовки колец

подшипников в целях исключения вероятности заклинивания и обеспечения равномерных деформаций по поверхности запрессовки [6].

**Цель работы** — повышение технологической надежности роботизированной сборки на основе применения опоры качения. Изучение возникающих контактных реакций и моментов при двух вариантах базирования: жестком и на опоре качения.

Для сборки с пассивной адаптацией необходимо создать технологическую оснастку и разработать схему совмещения деталей, провести физические эксперименты для плавающего и жесткого базирования и, используя силомоментный датчик, определить силы, возникающие при сопряжении.

С помощью аналитических математических моделей сопряжения в квазистатической постановке определим реакции в точках контакта сопрягаемых деталей.

### Математические модели

Заклинивание вала в отверстии иногда происходит при соблюдении условий отсутствия заклинивания, полученных теоретическим путем. Как правило, это связано с допущениями, принятыми в математической модели. Кроме того, многие модели создавались применительно к автоматам и не учитывали специфику роботизированной сборки. При закреплении вала посредством схвата помимо осевой силы могут возникать радиальная сила и изгибающий момент [7, 8].

Рассмотрим две математические модели расчета условий роботизированной сборки

в квазистатической постановке при двухточечном контакте с жестким базированием втулки и при базировании ее на опоре качения. Для определения сил и моментов в зоне сборки на выходном звене робота установлен силомоментный датчик Schunk IT AXIA.

Схема сил при жестком базировании (рис. 1, а).

С учетом допущения малости угла перекоса принимаем:

$$\sin \varphi \approx \varphi; \quad \cos \varphi \approx 1. \quad (1)$$

Тогда угол  $\varphi$  можно определить в зависимости от глубины сопряжения:

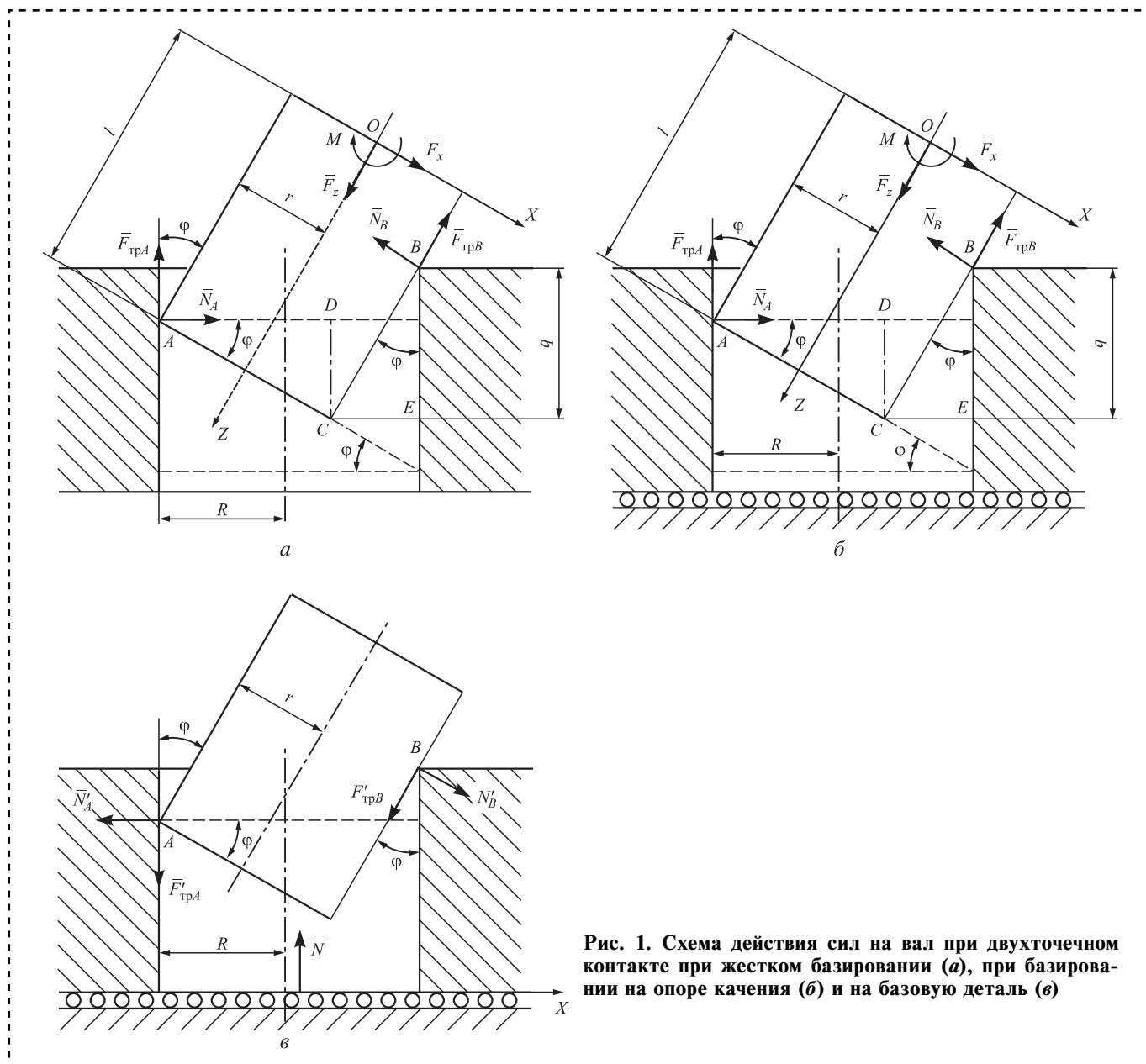


Рис. 1. Схема действия сил на вал при двухточечном контакте при жестком базировании (а), при базировании на опоре качения (б) и на базовую деталь (в)



$$\varphi = \frac{2R - 2r}{q} = 2 \frac{R - r}{q}. \quad (2)$$

Составим уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \sum F_{kx} = 0: F_x - N_B + N_A \cos \varphi - F_{\text{тр}A} \sin \varphi &= 0; \\ \sum F_{kz} = 0: F_z - F_{\text{тр}B} - F_{\text{тр}A} \cos \varphi - N_A \sin \varphi &= 0; \\ \sum M_0(F_k) = 0: F_{\text{тр}B} r - N_B \left( l - \frac{q}{\cos \varphi} \right) + \\ + N_A l \cos \varphi - N_A r \sin \varphi - F_{\text{тр}A} r \cos \varphi - \\ - F_{\text{тр}A} l \sin \varphi - M &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $l$  — расстояние от торца вала до центра координат силомоментного датчика.

Рассмотрим предельное состояние равновесия, определяемое из условий заклинивания:

$$F_{\text{тр}A} = fN_A; \quad F_{\text{тр}B} = fN_B, \quad (4)$$

где  $f$  — коэффициент трения.

Тогда уравнения равновесия приобретут вид:

$$\begin{cases} F_x - N_B + N_A \cos \varphi - fN_A \sin \varphi = 0; \\ F_z - fN_B - fN_A \cos \varphi - N_A \sin \varphi = 0; \\ fN_B r - N_B \left( l - \frac{q}{\cos \varphi} \right) + \\ + N_A (l \cos \varphi - r \sin \varphi) - \\ - fN_A (r \cos \varphi + l \sin \varphi) - M = 0. \end{cases} \quad (5)$$

С учетом приближения (1) система уравнений (5) приобретает вид:

$$\begin{cases} F_x - N_B + N_A (1 - f\varphi) = 0; \\ F_z - fN_B - N_A (f + \varphi) = 0; \\ N_B (fr - l + q) + \\ + N_A (l - r\varphi - fr - fl\varphi) - M = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из первого уравнения системы (6) выразим  $N_B$ :

$$N_B = F_x + N_A (1 - f\varphi). \quad (7)$$

Во второе уравнение системы (6) подставим (7) и получим:

$$N_A = \frac{F_z - fF_x}{f - f^2\varphi + f + \varphi} = \frac{F_z - fF_x}{2f + \varphi(1 - f^2)}. \quad (8)$$

С учетом соотношения (2) имеем:

$$N_A = \frac{F_z - fF_x}{2f + 2 \frac{R - r}{q} (1 - f^2)}. \quad (9)$$

Подставим уравнение (9) в выражение (7) и, учитывая формулу (2), получим:

$$N_B = F_x + \frac{F_z - fF_x}{2f + 2 \frac{R - r}{q} (1 - f^2)} \left( 1 - 2f \frac{R - r}{q} \right). \quad (10)$$

Выразим момент  $M$ :

$$\begin{aligned} M = \left[ F_x + \frac{F_z - fF_x}{2f + 2 \frac{R - r}{q} (1 - f^2)} \left( 1 - 2f \frac{R - r}{q} \right) \right] \times \\ \times (fr - l + q) + \frac{F_z - fF_x}{2f + 2 \frac{R - r}{q} (1 - f^2)} \times \\ \times \left[ l - fr - 2 \frac{R - r}{q} (r + fl) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой функцию, связывающую момент  $M$  с силами  $F_x$  и  $F_z$  в условиях предельного состояния системы по трению.

Практическое применение данной функции состоит в следующем: получив значения  $F_x$  и  $F_z$  с силомоментного датчика, можно по формуле (11) вычислить расчетный момент  $M_p$  и сравнить его со значением момента, полученным с датчика  $M_d$ .

*Схема с плавающим базированием* (рис. 1, б).

Составим уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0: F_x - N_B + N_A \cos \varphi - F_{\text{тр}A} \sin \varphi = 0; \quad (12)$$

$$\sum F_{kz} = 0: F_z - F_{\text{тр}B} - F_{\text{тр}A} \cos \varphi - N_A \sin \varphi = 0; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum M_0(F_k) = 0: F_{\text{тр}B} r - N_B \left( l - \frac{q}{\cos \varphi} \right) + \\ + N_A l \cos \varphi - N_A r \sin \varphi - F_{\text{тр}A} r \cos \varphi - \\ - F_{\text{тр}A} l \sin \varphi - M = 0; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sum F_{kx_1} = 0: -N_A + N_B \cos \varphi - F_{\text{тр}B} \sin \varphi = 0. \quad (15)$$

Первые три уравнения составлены для условия равновесия вала, четвертое — для базовой детали, размещенной на опоре качения (рис. 1, в).

С учетом допущения (1) система уравнений приобретает вид:

$$\begin{cases} F_x - N_B + N_A - F_{\text{тр}A} \varphi = 0; \\ F_z - F_{\text{тр}B} - F_{\text{тр}A} - N_A \varphi = 0; \\ F_{\text{тр}B} r - N_B (l - q) + N_A (l - r\varphi) - \\ - F_{\text{тр}A} (r + \varphi l) - M = 0; \\ -N_A + N_B - F_{\text{тр}B} \varphi = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Из четвертого уравнения системы (16) выразим  $N_A$  и подставим в остальные уравнения:

$$\begin{cases} F_x - F_{\text{тр}B} \varphi - F_{\text{тр}A} \varphi = 0; \\ F_z - F_{\text{тр}B} - F_{\text{тр}A} - N_B \varphi + F_{\text{тр}B} \varphi^2 = 0; \\ F_{\text{тр}B} r - N_B (l - q) + N_B (l - r \varphi) - \\ - F_{\text{тр}B} \varphi (l - r \varphi) - F_{\text{тр}A} (r - \varphi l) - M = 0; \\ N_A = N_B - F_{\text{тр}B} \varphi. \end{cases} \quad (17)$$

Выразим из третьего уравнения системы (17)  $F_{\text{тр}B}$ :

$$F_{\text{тр}B} = \frac{F_x \left( \frac{q}{\varphi^2} - l \right) + M - F_z \left( \frac{q}{\varphi} - r \right)}{(2r - 2\varphi l - 2r\varphi^2 + \varphi q)}. \quad (18)$$

После преобразований определим силы  $N_B$ ,  $F_{\text{тр}A}$  и  $N_A$  соответственно.

Таким образом, используя показания силомоментного датчика, вычисляем все силы в точках контакта сопрягаемых деталей.

В соответствии с законами трения Кулона в состоянии равновесия имеет место следующее соотношение между силами трения и нормальными реакциями:

$$F_{\text{тр}A} \leq fN_A; \quad F_{\text{тр}B} \leq fN_B,$$

а при взаимном перемещении деталей:

$$F_{\text{тр}A} = fN_A; \quad F_{\text{тр}B} = fN_B.$$

Датчик измеряет силы вдоль трех осей координат  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$ :  $Z_2$  — осевая;  $X_2$ ,  $Y_2$  — радиальные, а также моменты относительно данных осей.

Учитывая, что расположение точек контакта относительно осей  $X_2$  и  $Y_2$  неизвестно, но при этом известно, что контакт двухточечный, силы, направленные вдоль этих осей  $F_{x_2}$  и  $F_{y_2}$  и моменты этих сил следует сложить геометрически:

$$F_x = \sqrt{(F_{x_2})^2 + (F_{y_2})^2};$$

$$M = \sqrt{(M_{x_2})^2 + (M_{y_2})^2}.$$

### Технологическая оснастка

Для проведения эксперимента разработана технологическая оснастка (рис. 2). Присоединяемый вал закреплен жестко, а втулка распо-



Рис. 2. Опора качения (технологическая оснастка)

лагается на плавающей опоре. При совмещении вала с отверстием втулки происходит относительное смещение базовой детали за счет качения шариков и безотказная сборка.

### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Возникающие силы и моменты при сопряжении с жестким и плавающим базированием определяли с помощью силомоментного датчика Schunk IT AXIA.

Нижнюю часть оснастки устанавливали в патрон и зажимали. В неподвижную опору засыпали шарики подшипника, сверху на эти шарики ставили верхнюю часть оснастки. Конструкция корпусов обеспечивала возможность горизонтального смещения в пределах 1 мм. Втулку устанавливали по скользящей посадке в отверстие верхней части оснастки, вал — в хват робота. При соединении вала со втулкой шарики обеспечивали верхнему корпусу возможность смещения для сопряжения без заклинивания (рис. 3, а на стр. 2 обложки).

При сопряжении вала с отверстием втулки возникали силы, измеряемые силомоментным датчиком (рис. 3, б на стр. 2 обложки). Зазор в соединении составлял 0,01 мм. Глубина сопряжения — 20 мм. Подача робота — 10 мм/с.

В эксперименте с жестким базированием втулку устанавливали непосредственно в патрон и зажимали кулачками. Таким образом, собираемые детали были жестко закреплены и не имели возможности смещения (рис. 4 на стр. 2 обложки).

По результатам экспериментов были определены возникающие силы. Расчет вели по максимально возникающим осевым силам  $F_z$ .





Исходные данные для эксперимента с жестким базированием:

$$F_z = 197 \text{ Н}; F_x = 37 \text{ Н}; F_y = 4 \text{ Н}; M_x = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\ M_y = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}; M_z = 0,002 \text{ Н}\cdot\text{м}; q = 0,02 \text{ м}; \\ l = 0,335 \text{ м}; R = 0,008 \text{ м}; r = 0,00799 \text{ м}; f = 0,18.$$

Рассчитаем  $N_A$  по формуле (8):

$$N_A = \frac{197 - 0,18 \cdot 37}{2 \cdot 0,18 + 2 \frac{0,008 - 0,00799}{0,02} (1 - 0,18^2)} = 529 \text{ Н}.$$

По формуле (10) находим  $N_B$ :

$$N_B = 37 + 529 \left( 1 - 2 \cdot 0,18 \frac{0,008 - 0,00799}{0,02} \right) = 566 \text{ Н}.$$

Определим силы трения в точках контакта "А" и "В":

$$F_{\text{тр}A} = fN_A = 0,18 \cdot 529 = 95 \text{ Н};$$

$$F_{\text{тр}B} = fN_B = 0,18 \cdot 566 = 102 \text{ Н}.$$

Вычисляем момент по формуле (11):

$$M_p = 566(0,18 \cdot 0,00799 - 0,335 + 0,02) + \\ + 529 \left[ 0,335 - 0,18 \cdot 0,00799 - 2 \times \right. \\ \left. \times \frac{0,008 - 0,00799}{0,02} (0,00799 + 0,18 \cdot 0,335) \right] = \\ = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При моменте более 2 Н·м в случае жесткого базирования будет происходить заклинивание.

Исходные данные в эксперименте с плавающим базированием:

$$F_z = 20 \text{ Н}; F_x = 1,5 \text{ Н}; F_y = 0,94 \text{ Н}; M_x = 0,3 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\ M_y = 0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}; M_z = 0,008 \text{ Н}\cdot\text{м}; q = 0,02 \text{ м}; \\ l = 0,335 \text{ м}; R = 0,008 \text{ м}; r = 0,00799 \text{ м}.$$

Рассчитаем  $F_{\text{тр}B}$  по формуле (18):

$$F_{\text{тр}B} = \frac{0,15 \left( \frac{0,02}{0,0025} - 0,33 \right) + 0,03 - \\ - 2 \left( \frac{0,02}{0,05} - 0,007 \right)}{(2 \cdot 0,007 - 2 \cdot 0,05 \cdot 0,33 - 2 \cdot 0,007 \times \\ \times 0,0025 + 0,05 \cdot 0,02)} = \frac{0,394}{-0,018} = -22 \text{ Н}.$$

Из системы уравнений (17) выражаем силы  $N_B$ ,  $F_{\text{тр}A}$  и  $N_A$ :

$$N_B = -22 \cdot 0,05 + \frac{2}{0,05} - \frac{0,15}{0,0025} = -21 \text{ Н};$$

$$F_{\text{тр}A} = 2 - 22(0,0025 - 1) - 21 \cdot 0,05 = -25 \text{ Н};$$

$$N_A = -21 + 22 \cdot 0,05 = -20 \text{ Н}.$$

## Заключение

При плавающем базировании в процессе сопряжения на глубине 0,3 мм происходит скачок силы  $F_z$  до 20 Н; при жестком базировании на глубине 0,4 мм происходит скачок силы  $F_z$  до 198 Н, т.е. при схеме с плавающим базированием возникающая сила в 10 раз меньше, чем при схеме с жестким базированием.

Расчеты по математическим моделям позволяют утверждать, что реакции, возникающие при плавающем базировании, уменьшились в 27 раз, а силы трения — в 4 раза. Это подтверждает предположение о том, что плавающее базирование существенно снижает сборочные силы и повышает технологическую надежность процесса сопряжения.

## Библиографический список

1. **Технология** автоматической сборки / А.Г. Холодкова и др.; под ред. А.Г. Холодковой. М.: Машиностроение, 2010. 560 с.
2. **Божкова Л.В., Варганов М.В.** Автоматизация сборки изделий машиностроения с применением промышленных роботов и виброустройств. М.: Университет машиностроения. 2013. 318 с.
3. **Божкова Л.В., Варганов М.В., Кольчугин Е.И.** Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2006. № 9. С. 19–24.
4. **Божкова Л.В., Варганов М.В., Мбуа Баке-на Ж.К.** Совершенствование технологии сборки деталей цилиндрического профиля с использованием вибрационной и пассивной адаптации // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2010. № 7. С. 26–32.
5. **Шуваев В.Г.** Автоматизация ультразвуковой сборки пресовых соединений // Материалы V научно-технического семинара "Современные технологии сборки". М.: Московский Политех, 2017. С. 83–90.
6. **Вороненко В.П., Шашин А.Д.** Исследование факторов, влияющих на качество "вала в сборе" при автоматизированной запресовке подшипников на валы // Материалы IV научно-технического семинара "Современные технологии сборки". М.: Московский Политех. 2015. С. 94–99.
7. **Amar Saric, Jing Xiao, Jane Shi.** Robotic surface assembly via contact state transitions // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2013. P. 954–959.
8. **Changman Son** Comparison of optimal motion planning algorithms for intelligent control of robotic part micro-assembly task // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. No. 46. P. 508–517.

А.А. Иванов, О.В. Кретинин, д-ра техн. наук

(Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева)

E-mail: kretinin@list.ru

## Сборка металлокерамических корпусов интегральных микросхем

Рассмотрены технологические процессы сборки наиболее массовых металлокерамических корпусов интегральных микросхем (ИМС) с планарными и штырьковыми контактными выводами на автоматической модульной линии. Предложено для автоматизированного цеха сборки корпусов объединить сборочную линию и участок автоматов касетирования единой транспортно-накопительной системой. Внедрение линии сборки корпусов ИМС в производство обеспечит повышение производительности труда в 3...5 раз при сокращении численности обслуживающего персонала в среднем в 3 раза.

Technological processes of assembly of the most mass metal-ceramic IC cases with planar and pin contact conclusions on the automatic modular line are considered. It is proposed for the automated shop of assembly of cases to combine the assembly line and a site of automatic cassetting it into a single transport-accumulative system. The introduction of the IC hull assembly line into production provides an increase in labor productivity by 3...5 times while reducing the number of service personnel by an average of 3 times.

**Ключевые слова:** модульная линия, автоматизированный сборочный цех, технологический спутник.

**Keywords:** modular line, automated assembly shop, technological satellite.

В большинстве случаев сборку корпусов интегральных микросхем (ИМС) проводят в технологических спутниках, обеспечивающих взаимную ориентацию и базирование деталей корпуса. При сборке металлокерамических корпусов используют спутники из специальной керамики, поскольку детали корпусов соединяются в печи методом высокотемпературной пайки. В целях повышения производительности в сборочных комплексах применяют двухместные спутники, которые в свою очередь вкладываются в унифицированные транспортные спутники.

Рассмотрим технологические процессы сборки наиболее массовых металлокерамических корпусов ИМС с планарными и штырьковыми контактными выводами. Сборку безрадиаторных корпусов с планарными выводами проводят на автоматической сборочной линии, состоящей из пяти базовых сборочных модулей (рис. 1).

Технологический процесс начинается с установки в кассетный

накопитель 1 первого модуля линии штабеля плоских кассет 2 со специальными поддонами 4, в которых штабелированы керамические спутники 3 с собранными корпусами, прошедшими пайку вне линии. Загрузочный робот первого модуля выгружает из поддона одновременно два керамических спутника с корпусами и устанавливает их в транспорт-

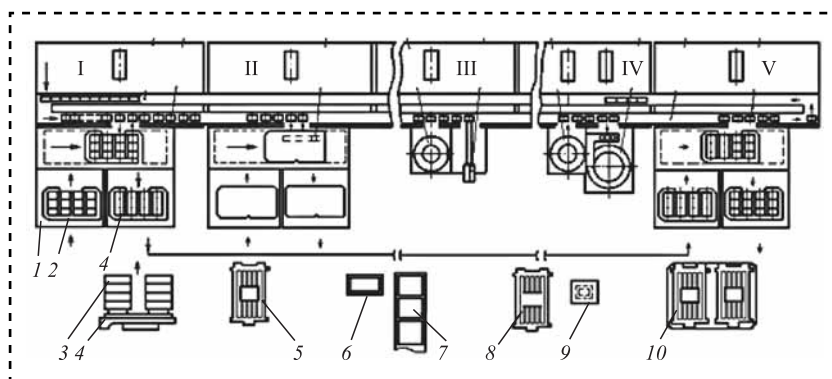


Рис. 1. Технологическая схема сборки безрадиаторных металлокерамических корпусов ИМС с планарными контактными выводами:

1 — кассетный накопитель; 2 — плоская кассета; 3 — керамические спутники; 4 — поддон; 5 — спаянный корпус; 6 — металлический ободок; 7 — припойные полосы; 8 — выводная рамка; 9 — керамическая плата; 10 — собранный корпус; I—V — модули



ные спутники, передаваемые с возвратной на рабочую ветвь тактового конвейера линии. Освободившиеся поддоны транспортируют в конец линии и подготавливают к установке в кассетный накопитель пятого модуля.

На втором модуле робот выгружает одновременно четыре спаянных корпуса 5 из керамических спутников и укладывает их в ячейки плоской кассеты 2. Заполненные кассеты с корпусами отправляют на контроль герметичности.

Сборка корпуса начинается с третьего модуля, на котором робот загружает в освободившиеся керамические спутники два металлических ободка 6 из магазина стержневого типа, а затем специальное устройство отрезает от полос 7 и укладывает две припойные прокладки. На четвертом модуле робот последовательно загружает в спутник из магазина стержневого типа две выводные рамки 8, а с выходного лотка вибробункера — керамические платы 9. На пятом модуле технологические спутники с собранными корпусами 10 выгружаются роботом в поддоны 4 с одновременным штабелированием спутников в три-четыре яруса. Поддоны с собранными корпусами отправляются на участок пайки в водородной печи, а транспортные спутники передаются на возвратную ветвь конвейера, которая доставляет их на вход первого модуля.

Структура пятимодульной сборочной линии (СЛ) показана на рис. 2.

Сборка одной из модификаций металлокерамического корпуса 2 ИМС, содержащего радиатор, осуществляется на СЛ, состоящей из шести модулей. Первые два модуля выполняют те же операции, что и на линии из пяти

модулей: перегрузку спутников 1 из поддонов в транспортные спутники линии и выгрузку собранных корпусов из спутников в ячейки плоской кассеты (рис. 3, а). На третьем модуле робот забирает с выходного лотка магнитного загрузочного устройства радиаторную пластину 3 с приваренным кольцом из припоя и устанавливает ее в гнездо освобожденного технологического спутника 1. После этого спутник перемещается на шаг. На четвертом модуле робот забирает из лотка бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) керамическую плату 4 и устанавливает ее на радиаторную пластину. На пятом модуле в спутник из кассеты устанавливается выводная рамка 5 с приваренными припойными полосками. На шестом модуле технологические спутники с деталями корпуса перегружают из транспортных спутников на поддон. На поддоне спутники штабелируются в три яруса и поддоны со спутниками поступают на рабочее место оператора, где на них устанавливают верхнюю крышку и зажимы, а затем пакет спутников отправляется в печь пайки.

На линии сборки корпусов ИМС со штырьковыми выводами штабелирование спутников не проводится, поэтому технологический процесс начинается с выгрузки роботом пустых технологических спутников 1 из кассеты на транспортер (рис. 3, б). Далее последовательно укладываются в спутник керамическая плата 2 и сухарик 3 из магазина, припойная прокладка 4 и металлический ободок 5, две выводные рамки 6 и керамические клинья 7 из кассеты для поджатия выводных рамок к основанию корпуса. На шестом модуле спутники с собранными корпусами 8 перегружают с транспортера в кассету, которая отправляется на участок пайки. Подготовительные операции, в частности приварку припойного кольца к радиатору и припойных полос к выводным рамкам, выполняют вне линии с помощью автоматического оборудования, которое располагается на участке кассетирования деталей.

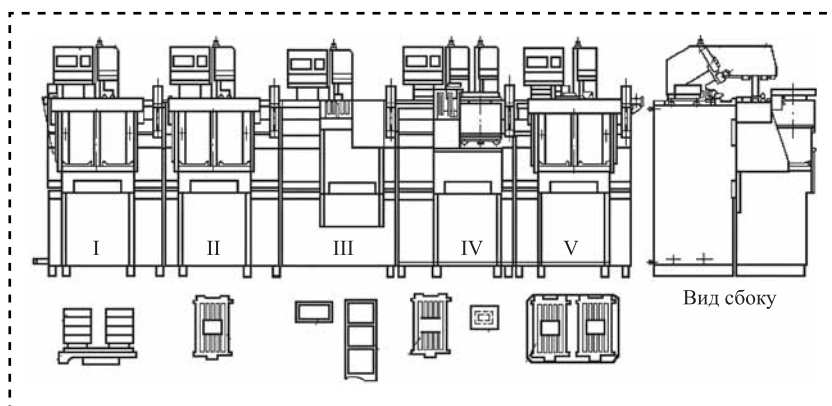
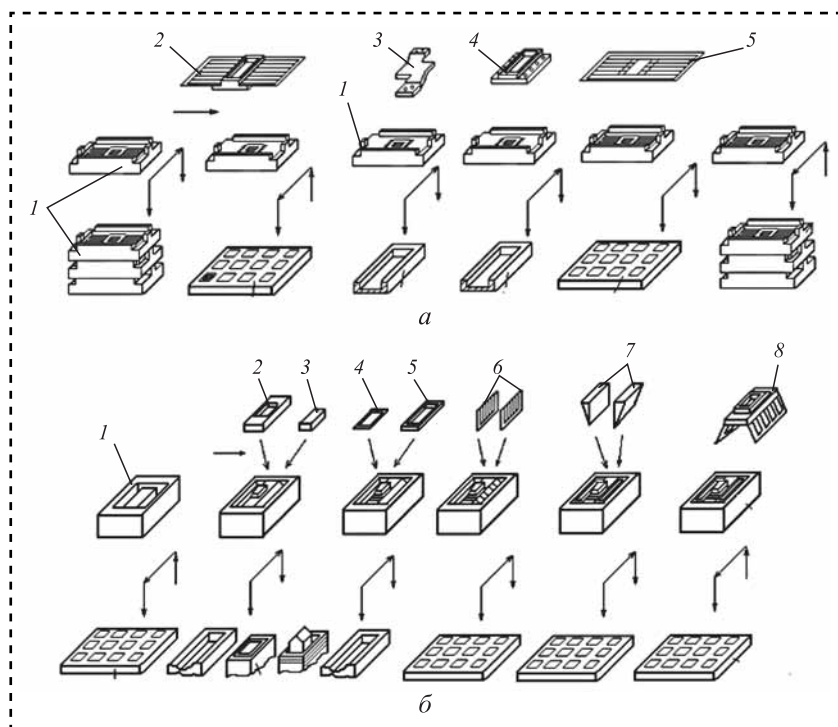


Рис. 2. Структура пятимодульной линии сборки металлокерамических корпусов ИМС с планарными выводами

Для некоторых типов керамических корпусов ИМС на операции присоединения кристалла одновременно выполняется операция сборки корпуса. В этом случае на

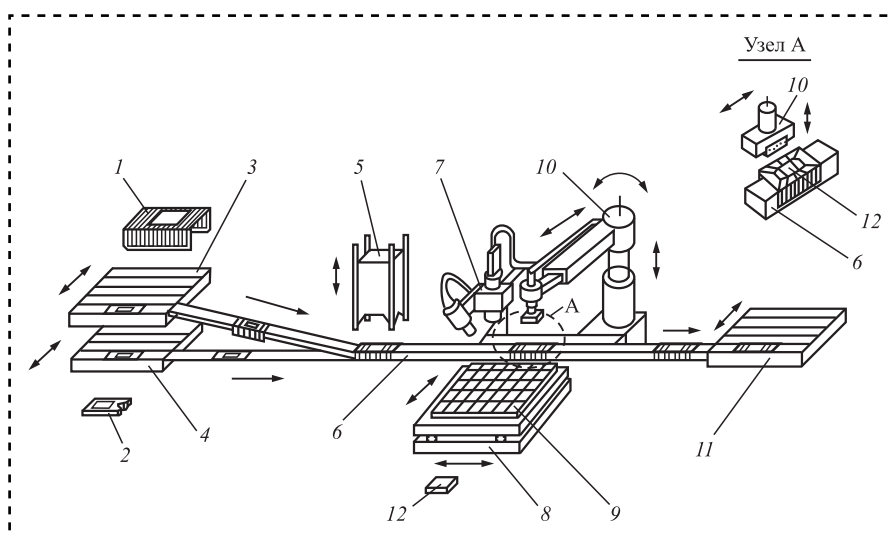


**Рис. 3. Технологические схемы сборки металлокерамических корпусов ИМС с планарными выводами и радиатором (а) и со штырьковыми выводами (б):**

а — 1 — спутник; 2 — корпус в сборе; 3 — радиаторная пластина; 4 — керамическая плата; 5 — выводная рамка; б — 1 — спутник; 2 — керамическая плата; 3 — сухарик; 4 — припойная прокладка; 5 — металлический ободок; 6 — выводные рамки; 7 — керамические клинья; 8 — корпус в сборе

сборочном участке используют модификацию модуля-автомата с дополнительным грузочным устройством и высокотемпературным нагревателем (до 450 °С).

Сборка ИМС в керамическом корпусе осуществляется на линейном транспортном тракте б (рис. 4), в который из ручьевой плоской кассеты 4 загружается керамическое основание 2 корпуса. Выводная рамка 1 подается из канала верхней кассеты 3. Совмещают две детали в первой позиции с помощью механизма 5. На второй позиции из кассеты 9, закрепленной на координатном столе 8, робот 10 забирает кристалл 12 и устанавливает его на предварительно нагретое

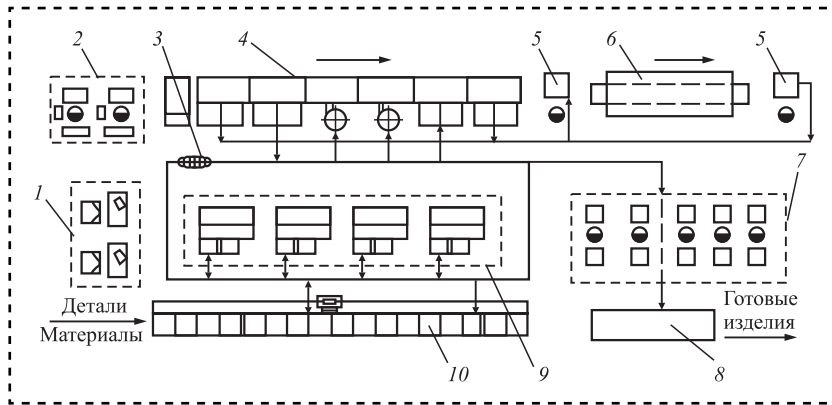


**Рис. 4. Линия сборки керамического корпуса ИМС со штырьковыми выводами и установки полупроводникового кристалла:**

1 — выводная рамка; 2 — керамическое основание; 3 — кассета с керамическими крышками; 4 — кассета с керамическими основаниями; 5 — пуансон для соединения деталей корпуса; 6 — тактовый конвейер; 7 — датчик; 8 — координатный стол; 9 — кассета; 10 — сборочный робот для установки кристалла; 11 — кассета для собранных приборов; 12 — кристаллы

в зонной печи основание 2 корпуса. Для улучшения качества соединения кристалла с корпусом захват робота 12 совершает колебательные движения. Цикл присоединения кристалла завершается за 1 с при погрешности совмещения  $\pm 50$  мкм. С помощью датчика 7 контролируется прочность присоединения кристалла (по относительной протяженности паяного шва или клея по периметру кристалла), его смещение и перекос относительно базовых элементов корпуса, а также наличие трещин, царапин и загрязнений на кристалле. Собранные приборы выгружаются в ручьевую плоскую кассету 11, которая унифицирована с кассетами на входе модуля сборки.

Для организации автоматизированного цеха сборки корпусов сборочную линию 4 (рис. 5) и участок автоматов кассетирования 9 необходимо объединить единой транспортно-накопительной системой, включающей автоматизированный склад 10 для хранения



**Рис. 5. Схема автоматизированного цеха сборки корпусов ИМС:**

1 — УВК; 2 — СИО; 3 — транспортный робот; 4 — сборочная линия; 5 — АРМ; 6 — печь пайки; 7 — участок испытаний корпусов; 8 — накопитель готовой продукции; 9 — участок касетирования; 10 — автоматизированный склад

поступающих в цех деталей в таре общего назначения, материалов, пустых и заполненных кассет и транспортные средства 3 (например, робот-тележку). В состав цеха, кроме того, входят автоматизированные рабочие места 5 операторов (АРМ) для зажима-разжима пакетов спутников, печь пайки 6, участок контроля и испытаний приборов 7 с накопителем 8, участок инструментального обеспечения (СИО) 2 и системы поддержания параметров среды и энергообеспечения (на рисунке не показаны). Управление работой цеха осуществляет управляющий вычислительный комплекс (УВК) 1. Число необходимых линий определяется производственной мощностью цеха.

в таре общего назначения, материалов, пустых и заполненных кассет и транспортные роботы. Техничко-экономический анализ показывает, что внедрение автоматической линии сборки корпусов ИМС в производство обеспечивает повышение производительности труда в 3...5 раз при сокращении численности обслуживающего персонала в среднем в 3 раза.

## Заключение

Рассмотрены технологические процессы сборки наиболее массовых металлокерамических корпусов ИМС с планарными и штырьковыми контактными выводами. Показано, что они могут быть реализованы на автоматической сборочной линии модульного типа. Для организации автоматизированного цеха сборки корпусов сборочную линию и участок автоматов касетирования необходимо объединить единой транспортно-накопительной системой, включающей автоматизированный склад для хранения поступающих в цех деталей

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

**Ю.З. Житников**, д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева),

**Б.Ю. Житников**, д-р техн. наук (Владимирский филиал РАНХиГС),

**А.Е. Матросов**, канд. техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева)

E-mail: mae76@mail.ru

## Высокоточный многошпиндельный гайковерт для автоматизированного обеспечения герметичности стыков при сборке изделий, работающих при повышенных давлениях

*На основе теоретического и экспериментального анализа достижимой точности и стабильности основных сил автоматизированной затяжки резьбовых соединений разработан многошпиндельный гайковерт, обеспечивающий герметичность стыков изделий, работающих при повышенных давлениях.*

*Based on the theoretical and experimental analysis of achievable accuracy and stability of main forces of automated tightening of threaded joints, a multi-spindle nut has been developed, which ensures tightness of joints of articles operating at high pressures.*

**Ключевые слова:** сборка изделий, многошпиндельный гайковерт, затяжка резьбовых соединений, осевые силы, герметичность стыков, соединяемые узлы и детали, высокое давление.

**Keywords:** assembly of articles, multi-spindle nut wrench, tightening of threaded joints, axial forces, tightness of joints, connected units and parts, high pressure.

Высокая точность осевых сил затяжки групповых резьбовых соединений в пределах 12...15 % обеспечивается затяжкой в два этапа [1, 2]:

— первый этап — предварительная затяжка моментом в 5...10 % от номинального значения с контролем по моменту;

— второй этап — окончательная затяжка до требуемого значения с контролем угла поворота резьбовой детали.

Но для обеспечения герметичности стыков скрепленных узлов и деталей изделий, в полости которых имеется избыточное давление, этих требований недостаточно.

Необходимо дополнительное и наиболее важное требование — стабильность осевых сил затяжки резьбовых соединений в данной сборке.

На практике при сборке блока гидроусилителя экскаваторов давление в его полости достигает несколько десятков атмосфер, поэтому

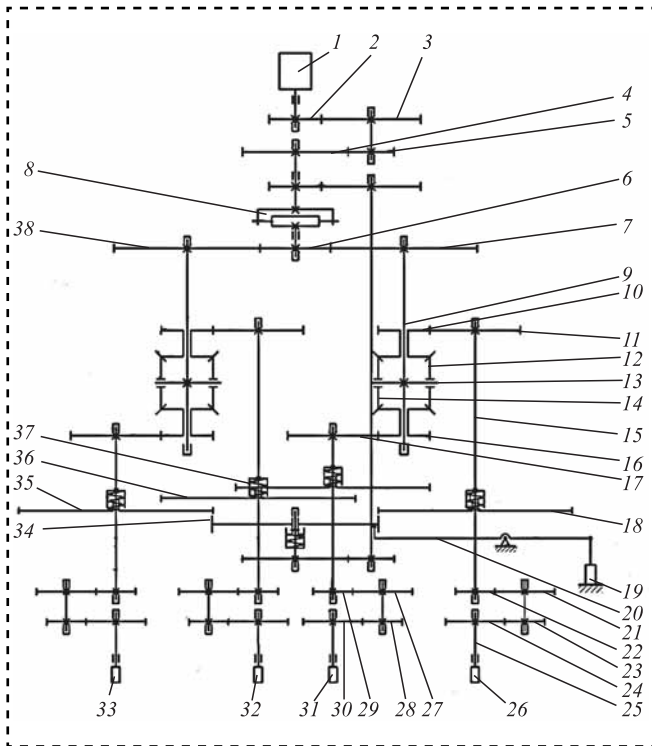
герметичность при автоматизированной сборке можно обеспечить, только если нестабильность осевых сил затяжки между резьбовыми соединениями данной сборки не превышает 5 % от номинального значения [1].

Проверим, выполняются ли эти требования при затяжке групповых резьбовых соединений многошпиндельными гайковертами на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизмов переключения вращений при переходе с предварительной на окончательную затяжку.

Рассмотрим кинематическую схему многошпиндельного гайковерта (рисунок).

Гайковерт имеет две ветви вращения: быстроходную, но маломоментную и тихоходную, но высокомоментную.

По быстроходным ветвям вращение передается от электродвигателя 1 через зубчатые передачи 2, 3 и 5, 4 на муфту предельного мо-



**Многошпиндельный гайковерт на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизма переключения скоростей вращения**

мента 8, далее — на центральную шестерню 6, которая передает вращение по двум кинематическим ветвям. По первой — от шестерни 6 к колесу 7, сидящему на валу 9 дифференциального механизма. Вал 9 жестко связан с водилом 13, на котором расположены сателлиты 12, 14, взаимодействующие с двумя сдвоенными зубчатыми передачами, за счет чего движение передается по двум направлениям.

По первому — от сателлита 12 вращение передается к сдвоенной зубчатой передаче 10 на колесо 11, вал 15, далее через зубчатые передачи 21, 22 и 23, 24 — к шпинделю 25, патрону 26 и к резьбовой детали.

По второму — от сателлита 14 вращение передается через сдвоенную зубчатую передачу 16 на колесо 17 и через зубчатые передачи 27, 29 и 28, 30 — к патрону 31, удерживающему резьбовую деталь.

Быстроходное вращение по второй ветви от шестерни 6 передается колесу 38 на ось второго дифференциала и по аналогии с предыдущим — к патронам 32 и 33.

При завинчивании и предварительной затяжке резьбовых деталей, в основном, вращение передается по быстроходным ветвям

вращения. Если моменты сопротивления на шпинделях одинаковы, то дифференциальные механизмы вращаются заодно. В случае если на одном из патронов, например на 26, момент сопротивления возрастет, то кинематическая ветвь от сдвоенной шестерни 10 до патрона 25 остановится, а кинематическая цепь от сдвоенной шестерни 16 до патрона 31 начнет вращаться с удвоенной угловой скоростью (согласно свойствам дифференциала). Как только моменты сопротивления на шпинделях с патронами 26 и 31 будут одинаковы, вновь начнут вращаться оба шпинделя.

Подобные режимы вращения могут повторяться неоднократно в процессе завинчивания и предварительной затяжки резьбовых соединений.

Как только суммарный момент сопротивления предварительной затяжки достигнет момента настройки муфты предельного момента 8, шпиндели остановятся из-за проскальзывания полумуфт. От датчика, установленного на подвижной полумуфте, будет дан сигнал на электромагнит 19, подвижная шестерня 34 рычагом 20 войдет в зацепление с зубчатыми колесами 18, 35, 36, 37, на шпиндели будет передаваться медленное, но высокомоментное вращение, и начнется процесс практически синхронной окончательной затяжки резьбовых соединений. При повороте шпинделей на требуемый угол, который отсчитывается датчиком, установленным на подвижной полумуфте, подается команда на отключение привода гайковерта.

Проанализируем процесс затяжки резьбовых соединений с требуемой точностью и стабильностью осевых сил на примере резьбовых соединений с параметрами:

Диаметр резьбовой детали $M_8$ , мм	8
Шаг резьбы $P$ , мм	1,25
Длина резьбы $l_8$ , мм	20
Допустимое отклонение длины резьбы $T_8$ , мм	0,017
Площадь поперечного сечения резьбовой детали $F_8$ , мм <sup>2</sup>	0,5024
Осевая сила затяжки $Q$ , Н	26 700
Модуль упругости материала резьбовой детали $E$ , Н/см <sup>2</sup>	$2 \cdot 10^7$

Дифференциальный механизм работает следующим образом. Как только момент сопротивления по одной из кинематических



цепей от дифференциала до шпинделя будет больше, чем по второй на половину, вращение по этой цепи прекратится, а по второй мало-моментной цепи частота вращения возрастет в два раза. Как только моменты сопротивления в кинематических цепях сравняются, то вновь вращение будет передаваться по обеим цепями и такой режим может повторяться.

Следовательно, по кинематической цепи с малым сопротивлением предварительная затяжка завершится раньше, чем по цепи с большим сопротивлением.

Если момент сопротивления на выходном валу муфты предельного момента достигнет момента ее настройки, то произойдет отключение передачи вращения из-за проскальзывания полумуфт и завершится процесс предварительной затяжки.

Пусть на одном из резьбовых соединений из-за неточности изготовления резьб и шероховатости их поверхностей сопротивление будет больше, чем на остальных. Кроме того, на этой резьбовой детали длина нарезанной части резьбы будет больше в пределах поля допуска.

Найдем и сравним погрешности затяжки резьбовых соединений с малым сопротивлением в резьбе и с большим, с учетом большей длины нарезки резьбы.

На этапе предварительной затяжки возникнут погрешности углов затяжки от нестабильности моментов сопротивлений в резьбовых соединениях и различной длины нарезанной резьбы.

Моментами сопротивления в зубчатых передачах и на их осях из-за малости по сравнению с сопротивлением в резьбе пренебрегаем.

Момент сопротивления в резьбе находим из выражения [6]:

$$M_3^{\text{пр}} = Q_3^{\text{пр}} \left[ \frac{1}{3} \mu_T \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} + \frac{d_2}{2} \operatorname{tg} \left( \frac{P}{\pi d_2} + \rho' \right) \right], \quad (1)$$

где  $Q_3^{\text{пр}}$  — осевая сила предварительной затяжки, составляет 5...10 % от номинального значения [2];

- $\mu_T$  — коэффициент трения на торце болта;
- $D$  — средний диаметр головки болта (размер под ключ завинчивания);
- $d_0$  — диаметр тела болта;
- $d_2$  — средний диаметр резьбы;
- $P$  — шаг резьбы;
- $\rho'$  — угол трения в резьбе.

Погрешность момента затяжки (осевой силы) нестабильности параметров резьбового соединения составляет [1, 2]:

$$\Delta Q_3 = Q_3 (22...30) \%, \quad (2)$$

где  $Q_3$  — осевая сила окончательной затяжки.

Осевая сила предварительной затяжки, Н:

$$Q^{\text{пр}} = Q_3 \cdot 5 \% = 1335;$$

— при 22 % погрешность  $\Delta Q_{\text{пр}} = 293,7$  Н;

— при 30 % погрешность  $\Delta Q_{\text{пр}} = 400,5$  Н.

Так как точность настройки муфты предельного момента не влияет на стабильность осевых сил затяжки и незначительно изменяет осевую силу предварительной затяжки, учитывать ее при анализе погрешности не следует.

Погрешность угла поворота резьбовой детали при предварительной затяжке [6]:

$$\varphi = \frac{360 Q_{\text{пр}} l_{\delta}}{F_{\delta} E_{\delta} P}. \quad (3)$$

Погрешности углов рассогласования при предварительной затяжке от нестабильности сопротивления в резьбе:

— для минимальной погрешности —  $\Delta \varphi_{\text{мин}}^{\text{пр}} = 0,168^\circ$ ;

— для максимальной погрешности —  $\Delta \varphi_{\text{макс}}^{\text{пр}} = 0,229^\circ$ .

Погрешности углов предварительной затяжки от различной длины завинчивания резьбовых деталей:

— для минимального допуска на длину —  $0,012 \Delta \varphi_{\text{мин}}^{\text{дл}} = 3,456^\circ$ ;

— для максимального допуска на длину —  $0,017 \Delta \varphi_{\text{макс}}^{\text{дл}} = 4,896^\circ$ .

На этапе предварительной затяжки погрешности углов, т.е. недозавинчивание, составит:

$$\Delta \varphi^{\text{пр}} = \sqrt{(\Delta \varphi_{\text{мин}}^{\text{пр}})^2 + (\Delta \varphi_{\text{мин}}^{\text{дл}})^2}; \quad (4)$$

— для минимальной погрешности —  $\Delta \varphi_{\text{мин}}^{\text{пр}} = 3,460^\circ$ ;

— для максимальной погрешности —  $\Delta \varphi_{\text{макс}}^{\text{пр}} = 4,433^\circ$ .

Контроль качества окончательной затяжки осуществляется по углу поворота резьбовой детали. Погрешность измерения угла составляет 0,5°.

Суммарная погрешность углов затяжки равна:

— минимальная погрешность угла затяжки —  $\Delta \varphi_{\Sigma}^{\text{мин}} = 3,960^\circ$ ;

— максимальная погрешности угла затяжки —  $\Delta \varphi_{\Sigma}^{\text{макс}} = 4,933^\circ$ .



Угол окончательной затяжки резьбового соединения из выражения (3) равен  $\varphi_3 = 36,735^\circ$ .

Из пропорции найдем относительные погрешности углов затяжки.

Минимальная погрешность осевых сил затяжки резьбовых соединений —  $\Delta Q_{\min} = 10,7\%$ . Максимальная погрешность —  $\Delta Q_{\max} = 13,4\%$ .

Погрешность от нестабильности осевых сил затяжки многошпиндельным гайковертом на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизма переключения вращений составит:

$$\Delta Q = 13,42 - 10,78 = 2,64^\circ.$$

Экспериментальная проверка измерений осевых сил по удлинению резьбовых деталей показала следующие результаты:

— минимальная осевая сила затяжки —  $\Delta Q_{\min} = 11,98\%$ ;

— максимальная —  $\Delta Q_{\max} = 14,65\%$ .

Нестабильность осевых сил затяжки в данной сборке равна:

$$\Delta Q^{\text{нec}} = 14,65 - 11,98 = 2,67\%.$$

При такой нестабильности осевых сил затяжки резьбовых соединений многошпиндельным гайковертом обеспечивается герметичность стыков.

## Заключение

Разработанный многошпиндельный гайковерт на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизма переключения вращений обеспечивает качественную, с учетом герметичности стыков, сборку групповых резьбовых соединений.

## Библиографический список

1. **Воркуев Д.С., Житников Ю.З.** Разработка семейств высокоточных многошпиндельных гайковертов нового класса на основе одного привода / под общ. ред. Ю.З. Житникова. М.: Машиностроение, 2009. 204 с.
2. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 656 с.
3. **Житников Б.Ю., Симаков А.Л.** Методология разработки универсальных, высокоточных, многошпиндельных устройств нового класса / под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2002. 216 с.
4. **Пат. 2288834** Российская Федерация, А1С1, МПК В25, В21/00. Многошпиндельный гайковерт / Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросова Ю.Н.; опубл. 10.12.06. Бюл. № 34.
5. **Пат. 2345880** Российская Федерация, А1С1, МПК В25, В21/00, В23Р 19/06. Многошпиндельный гайковерт / Житников Б.Ю., Воркуев Д.С. и др; опубл. 10.12.09. Бюл. № 4.
6. **Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В.** Затяжка и стопорение резьбовых соединений: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.





**В.Г. Шуваев, д-р техн. наук, И.Н. Крылова**  
(Самарский государственный технический университет)  
E-mail: shuvaevvacheslav@ya.ru

## Обеспечение качественной затяжки резьбовых соединений по динамическим критериям

*Рассмотрены варианты нормируемой затяжки резьбовых соединений в процессе ультразвуковой сборки в зависимости от реакции системы на ударное воздействие, прикладываемое к резьбовому соединению в процессе затяжки. Приведена оригинальная схема устройства контроля качественной затяжки резьбового соединения по динамическому критерию в нелинейной области.*

*The options of normalized tightening of threaded connections in the process of ultrasonic assembly according to the tightening the system's response to the impact applied to the threaded connection during tightening are discussed. The original scheme of the device for monitoring the quality of tightening of a threaded connection by a dynamic criterion in the nonlinear domain is presented.*

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, затяжка, ультразвук, частотная характеристика, удар.

**Keywords:** threaded connection, tightening, ultrasound, frequency response, shock.

Резьбовые соединения обеспечивают возможность разборки и вторичной сборки изделий без повреждения сопрягаемых поверхностей деталей. Доля резьбовых соединений в машиностроительном производстве составляет 20...35 % от всех собираемых узлов, причем во многих случаях резьбовые соединения являются ответственными узлами, определяющими прочность, надежность и безопасность всей конструкции. Один из основных параметров качества резьбовых соединений — сила затяжки, которая создает заданное контактное напряжение на стыке соединяемых деталей, обеспечивает необходимую плотность и герметичность стыка при действии на соединение внешних сил.

Контроль силы затяжки резьбовых соединений осуществляют различными методами с оценкой соединения по вращающему моменту, углу поворота гайки, удлинению болта и т.д., однако все они имеют те или иные недостатки. Наиболее совершенный из применяемых методов тарированной затяжки — метод, в соответствии с которым затяжка проводится до достижения предела текучести материала болта, что позволяет добиваться максималь-

ного эффекта затяжки, наиболее полно используя прочностные свойства резьбового соединения [1].

Одно из решений проблемы обеспечения требуемого качества — дополнительное введение механических колебаний в формируемое резьбовое соединение, что дает возможность совместить операции свинчивания и контроля качества, получать оперативную информацию о динамических параметрах качества соединения непосредственно в процессе сборки [2].

При достижении предела текучести в процессе ультразвуковой сборки резьбового соединения проявляется нелинейность упругой характеристики механической колебательной системы, вызванная наличием пластичности, приводящая к искажению амплитудно-частотной характеристики и возникновению скелетной кривой, выражающей связь между частотой и амплитудой колебаний системы. Появление пластических деформаций крепежных элементов или собираемых деталей, приводит к нелинейности системы, и частота начинает зависеть от амплитуды колебаний.

При уменьшении коэффициента жесткости в случае достижения предела текучести систе-

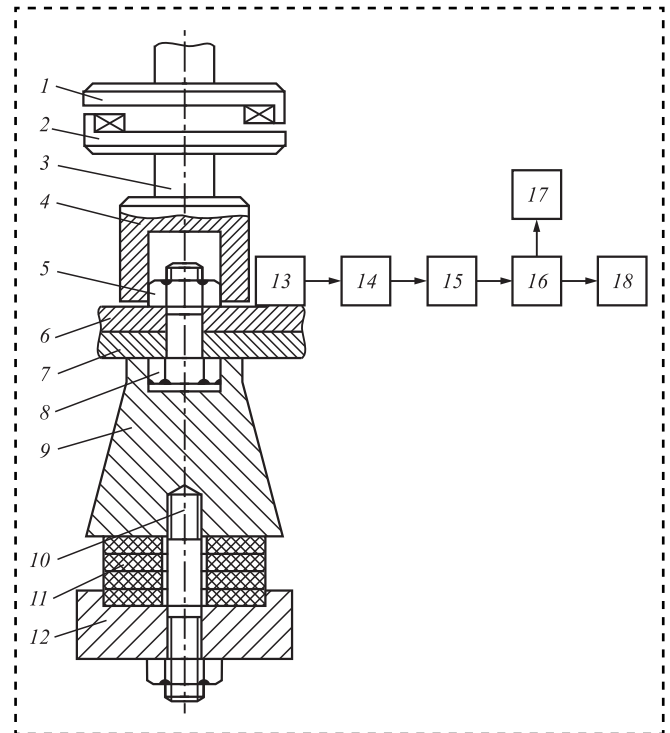
ма имеет так называемую мягкую характеристику, и скелетная кривая оказывается искривленной влево. Изменение амплитуды синусоидального воздействия приводит к тому, что пик резонансной кривой будет перемещаться по скелетной кривой, что и является основой предлагаемой технологии сборки. Фиксируется изменение знака приращения резонансной частоты, и при смене на отрицательный отмечается этот момент и выдается сигнал на прекращение затяжки резьбового соединения [5].

Улучшить качество идентификации можно увеличением до максимально возможной величины спектра входного воздействия, т.е. наилучший вариант представляет собой ударное входное воздействие [6]. Предложено наряду с ультразвуковыми колебаниями прикладывать в процессе сборки ударные воздействия и проводить анализ затухающих колебаний, которые будут представлять импульсную переходную характеристику системы (весовую функцию), т.е. вместо частотного анализа колебаний проводить временной анализ, что позволит повысить разрешающую способность, так как временные характеристики можно измерить точнее.

Нелинейность будет проявляться в изменении периода затухающих колебаний, что и положено в основу предлагаемого метода. При мягкой скелетной кривой будет уменьшение времени между импульсами и, зафиксировав этот момент, можно прекратить затяжку соединения, в случае линейной системы интервалы времени будут симметричными. Оценка неравномерности периода затухающих колебаний проводится путем сравнения промежутков времени между пересечениями кривой нулевого уровня.

На рисунке приведена схема разработанного гайковерта, позволяющего совместить ультразвуковые и ударные воздействия при формировании резьбового соединения. Ударный механизм включает боек 1 и наковальню 2. При последовательных ударных взаимодействиях бойка и наковальни вращательные импульсы передаются через шпиндель 3 и ключ 4 на гайку 5, которая затягивается с необходимой силой [7].

Под действием силы затяжки болт растягивается, и стягиваемые детали сжимаются. С помощью генератора электрических колебаний (на рисунке не показан) в пьезокерамиче-



**Устройство затяжки резьбовых соединений**

ском преобразователе 11 возбуждают ультразвуковые механические колебания, которые затем усиливают концентратором 9. Пьезокерамический преобразователь зажат шпилькой 10 между концентратором и частотоподающим элементом 12 (демпфером). Пьезокерамический преобразователь набран из дискретных шайб осевой поляризации, которые механически соединены последовательно, а электрически включены параллельно.

В изделии, состоящем из собираемых деталей 6 и 7, в процессе свинчивания возбуждаются колебания, добиваясь резонанса. Колебания, прошедшие через соединение (болт 8, гайка 5 и собираемые детали 6 и 7), воспринимаются датчиком вибрации 13, закрепленным на одной из собираемых деталей, и преобразуются в электрический сигнал, который поступает на вход фильтра низких частот 14. Одновременно с этим осуществляется приложение ударно-вращательных импульсов, под воздействием которых резьбовые соединения затягиваются за несколько ударных циклов.

Под воздействием удара формируется сигнал, из которого фильтр низких частот выделяет переходную характеристику системы, отстраиваясь от высокочастотных составляющих вибрации. Далее сигнал подается в ком-

паратор 15, где происходит его сравнение с нулевым уровнем, т.е. выделяются уровни больше и меньше нуля. Генератор тактовых импульсов 17 заполняет выделенные уровни высокочастотным сигналом, что и фиксируется в устройстве сравнения 16. Индикатор 18 отмечает результаты сравнения уровней сигналов больше и меньше нуля и сигнализирует о качественной затяжке резьбового соединения по динамическому критерию в нелинейной области.

Элементы конструкции устройства выполнены частично из высокоугругой стали 65Г и термообработанного дюралюминия типа Д16Т, в качестве датчика вибраций использовали датчики типа КВ-10 с пьезоэлектрической пластиной, работающей на изгиб.

Контроль степени затяжки, основанный на достижении силы затяжки в точке предела упругих деформаций материала резьбовых деталей, практически не зависит от трения, позволяет использовать крепежные детали меньшего диаметра и более низкого класса точности и обеспечивает минимальный разброс силы затяжки, в то время как традиционные методы контроля по крутящему моменту дают точность в пределах 20...25 %.

### Библиографический список

1. **Гусаков Б.В.** Отечественные и зарубежные методы и средства тарированной затяжки резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 9. 2003. С. 12—24.

2. **Штриков Б.Л., Головкин В.В., Шуваев В.Г., Шуваев И.В.** Повышение работоспособности резьбовых соединений путем применения ультразвука при обработке и сборке. М.: Машиностроение, 2009. 125 с.

3. **Шуваев В.Г., Непомилуев В.В., Рыкунов А.Н., Семенов А.Н.** Обеспечение качества сборки резьбовых соединений газотурбинных двигателей с помощью ультразвукового воздействия по критерию заданной прочности // Известия вузов. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 25—29.

4. **Quality Assurance of Assembling of GTE Threaded Joints by Ultrasonic Treatment upon the Required Strength Criterion / V.G. Shuvaev, V.V. Nepomiluev, A.N. Rykunov, A.N. Semenov // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62. No. 1. P. 171—174.**

5. **Шуваев В.Г.** Методология адаптивной ультразвуковой сборки резьбовых соединений гарантированного качества // Международный симпозиум "Надежность и качество". Пенза, 2018. С. 201—204.

6. **Основы измерений.** Датчики и электронные приборы: учебное пособие / К. Классен. Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2012. 352 с.

7. **Пат. 2502591 С2 RU. В25В 21/00.** Способ сборки резьбового соединения / В.Г. Шуваев, И.В. Шуваев; заявл. 12.07.2011; опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36. 6 с.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

### "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



**А.Н. Брысин**, канд. техн. наук, **А.С. Микаева**, канд. экон. наук,  
**С.А. Микаева**, д-р техн. наук, **Э.Л. Ларшина**  
(МИРЭА — Российский технологический университет, Москва)  
E-mail: mikaeva@npo.lit

## Сборка медицинского рециркулятора

*Описана сборка рециркулятора, предназначенного для обеззараживания воздуха помещений всех категорий в присутствии и отсутствии людей. Потенциальный потребитель рециркулятора — младший сестринский персонал лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных, общественных и иных организаций. Представлена кривая бактерицидного действия ультрафиолетового излучения и технические характеристики рециркулятора.*

*The assembly of a recirculator designed for decontamination of indoor air of all categories in the presence and absence of people are described. Potential consumer of the recirculator is junior nursing staff of medical and preventive, preschool, school, industrial, public and other organizations. The curve of bactericidal action of ultraviolet radiation and technical characteristics of the recirculator are presented.*

**Ключевые слова:** сборка, рециркулятор, характеристики, процесс работы, устройство.

**Keywords:** assembly, recirculator, characteristics, operation process, device.

**В** связи с тем, что все прогрессивное человечество борется с эпидемией коронавируса COVID-19, как никогда становится актуальным создание и производство новых приборов для обеззараживания воздуха во всех категориях помещений в присутствии и отсутствии людей.

Рециркулятор предназначен для обеззараживания воздуха помещений всех категорий согласно Руководству Р.3.5.1904-04 "Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях". В присутствии людей: в помещениях для предотвращения повышения уровня микробной обсемененности воздуха (особенно в случаях высокой степени риска распространения заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем). В отсутствие людей: в помещениях для снижения микробной обсемененности воздуха (в качестве заключительного звена в комплексе санитарно-гигиенических мероприятий).

Потенциальный потребитель рециркулятора — младший сестринский персонал лечебно-профилактических, дошкольных, школьных,

производственных, общественных и иных организаций.

Рециркулятор укомплектован безозоновыми амальгамными газоразрядными бактерицидными лампами низкого давления FOTOTRON, изготовленными на ООО Торговый дом "Лаборатория импульсной техники", Москва [1—9]. Ртуть внутри лампы находится в связанном состоянии, поэтому при бое лампы не требуется проводить меры по демеркуризации помещения [1—3, 5, 6].

Обеззараживание воздуха в рециркуляторе происходит за счет воздействия на микроорганизмы бактерицидного ультрафиолетового (УФ) излучения с длиной волны 254 нм. Инактивация микроорганизмов происходит за счет сообщения им достаточной дозы УФ-облучения [6, 7].

Рециркуляция воздуха осуществляется с помощью вентилятора. Воздух из помещения поступает внутрь рециркулятора снизу, проходит через фильтрующие элементы, поступает в зону облучения, где происходит его обеззараживание, затем — обратно в помещение.

Рециркулятор может применяться в лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных и общественных организациях и других помещениях в целях снижения содержащихся в воздухе микроорганизмов и профилактики инфекционных заболеваний.

Температура воздуха при эксплуатации — от + 4 до + 35 °С. Использование рециркулятора при более высокой температуре воздуха должно быть согласовано с предприятием-изготовителем. Климатическое исполнение рециркулятора — УХЛ, категория размещения 4.2 по ГОСТ 15150.

При воздействии УФ-излучения на живые микроорганизмы имеется оптимальный для их инактивации диапазон длин волн 250...280 нм (рис. 1).

Доза облучения  $D$  или количество энергии, сообщаемое микроорганизмам, является главной характеристикой рециркулятора УФ-обеззараживания:

$$D = \langle I \rangle \langle t \rangle,$$

где  $D$  — доза УФ-облучения,

$\langle I \rangle$  — средняя интенсивность УФ-облучения;

$\langle t \rangle$  — среднее время нахождения под облучением.

Экспериментально установленные значения летальных доз УФ-облучения для микро-

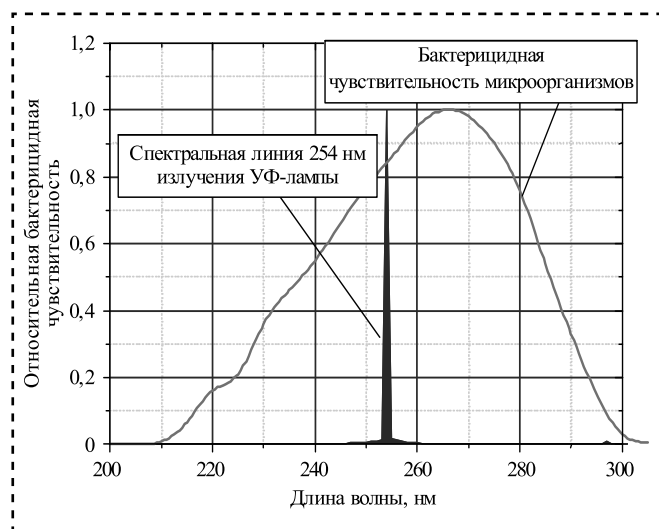


Рис. 1. Кривая бактерицидного действия ультрафиолетового излучения

организмов различных видов приведены в Руководстве Р 3.5.1904-04.

#### Технические характеристики рециркулятора

Напряжение питания, В . . . . .	220 ± 10%
Частота питающего напряжения, Гц . . . . .	50
Потребляемая мощность, не более, Вт . . . . .	565
Род тока . . . . .	Однофазный
Число ламп, шт. . . . .	1
Число ЭПРА, шт. . . . .	1
Число вентиляторов, шт. . . . .	1
Число воздушных фильтров G4, шт. . . . .	6
Число воздушных фильтров F5, шт. . . . .	6
Габаритные размеры: высота×ширина×глубина, мм . . . . .	1378×890×581
Масса, не более, кг . . . . .	90
Материал корпуса:	
АЭРОЛИТ 500S . . . . .	Коррозионно-стойкая сталь AISI
АЭРОЛИТ 500 . . . . .	Окрашенная сталь
Степень пыле- и влагозащитности. . . . .	IP 20
Панель оператора . . . . .	ЖК-дисплей
Отключение по перегреву . . . . .	Есть
Контроль времени наработки . . . . .	Да
Сетевой кабель с вилкой. . . . .	Да
Длина сетевого кабеля, м . . . . .	6

#### Основное электрооборудование

Тип лампы (безозоновое исполнение) . . . . .	FOTOTRON 368
Номинальный ресурс работы лампы, ч . . . . .	12 000
Число включений/выключений лампы, раз . . . . .	5000
Время выхода УФ-лампы на режим, мин. . . . .	2
Материал колбы лампы . . . . .	Безозоновое кварцевое стекло
Тип вентилятора. . . . .	Центробежный
Мощность вентилятора, Вт, не более. . . . .	65
Тип ЭПРА . . . . .	ЭПРА Л-220-1х600-2222-161
Класс оборудования по способу защиты от поражения электрическим током . . . . .	I
Корректированный уровень звуковой мощности, дБА, не более . . . . .	50

### Условия эксплуатации

Расположение .....	В помещениях (indoor)
Тип помещений .....	Закрытые отапливаемые и вентилируемые
Относительная влажность при +25 °С, % .....	80
Температура окружающего воздуха, °С .....	+4...+35

Режим работы рециркулятора с одной включенной лампой представлен в табл. 1.

Бактерицидная эффективность  $I_{\text{БК}}$  работы рециркулятора с производительностью 250, 375 и 500 м<sup>3</sup>/ч для микроорганизмов: КМАФА нМ/ОМЧ; *S. aureus*; *E. coli*; *C. difficile*; *Enterobacter sp.*; *M. tuberculosis*; *K. pneumonia*; *P. aeruginosa*; вируса гриппа составила 99,9 %.

Рециркулятор представляет собой корпус 1 (рис. 2), смонтированный на передвижной подставке с колесными опорами 4, две из которых имеют тормоз. Диаметр колес 100 мм. Корпус рециркулятора оснащен дверью 3 на петлях и замком 10, предохраняющим от несанкционированного проникновения внутрь рециркулятора. Для удобства манипуляций на корпусе установлены ручки 7.

На двери корпуса расположена сенсорная панель оператора 2, на задней стенке — главный выключатель 6. Окно выброса обеззараженного воздуха 5 на верхней стенке корпуса, защищено стальной вентиляционной решеткой. Рециркулятор имеет сетевой шнур 11, длиной 6 м с вилкой УЗО (устройство защитного отключения). На задней стенке рециркулятора расположены специальные держатели 12 для хранения сетевого шнура. Окна забор воздуха на корпусе рециркулятора снабжены пластиковыми вентиляционными решетками 9 с воздушными фильтрами G4

Таблица 1

Режим работы рециркулятора

Режим	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Корректированный уровень звуковой мощности, дБА	Потребляемая мощность, Вт
1	250 ± 10 %	32	523
2	375 ± 10 %	40	552
3	500 ± 10 %	49	565

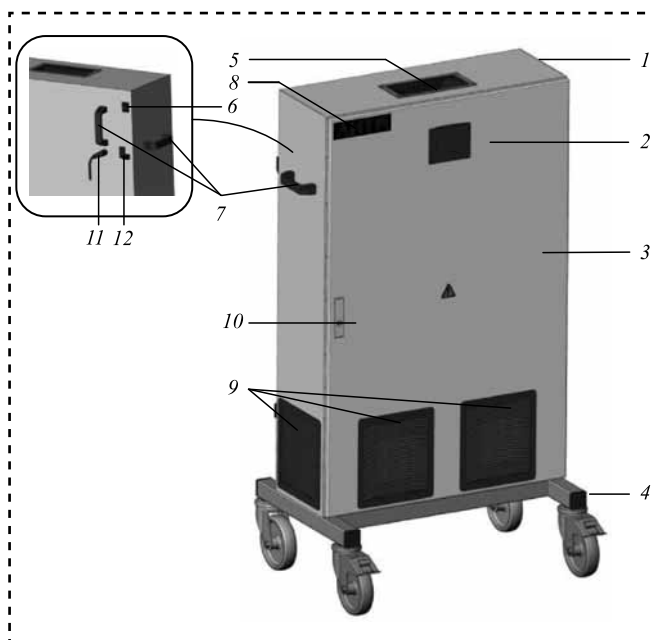


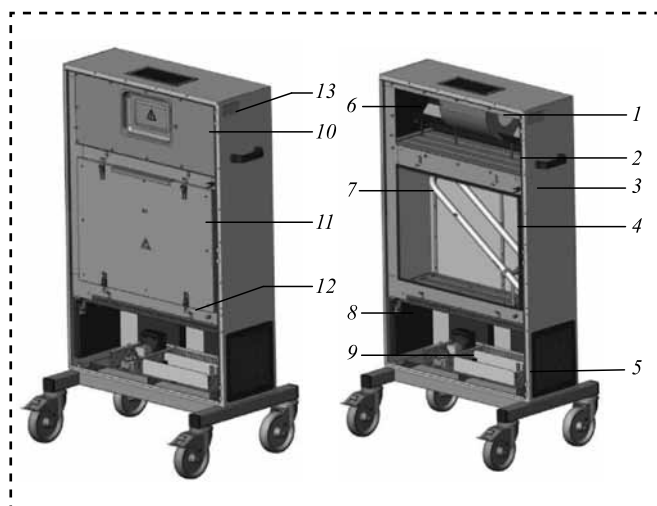
Рис. 2. Общий вид рециркулятора:

1 — корпус; 2 — панель оператора; 3 — дверь; 4 — подставка с колесными опорами; 5 — окно выброса обеззараженного воздуха; 6 — главный выключатель; 7 — ручка; 8 — логотип; 9 — решетка вентиляционная; 10 — замок; 11 — сетевой шнур с вилкой УЗО; 12 — держатель сетевого шнура

и F5 класса очистки. Замена воздушных фильтров осуществляется снаружи рециркулятора без открытия двери.

В нижней части рециркулятора расположена монтажная панель с электрооборудованием, а оставшийся объем корпуса рециркулятора занимает короб со съемными крышками. Центральная часть короба выполняет роль зоны облучения 7 с УФ-лампой 4 (рис. 3). Стенки короба оснащены светоотражателями. Верхняя часть короба служит вентиляционной камерой 6 с вентилятором 1. Для удобства обслуживания крышка зоны облучения фиксируется защелками 12 и является быстросъемной. Зона облучения и вентиляционная камера разделены световой решеткой 2, снижающей выход УФ из зоны облучения. Такая же решетка стоит в нижней части зоны облучения. Подключение УФ-лампы проводится с помощью разъемов.

Особенности рециркулятора: мобильность, простота и удобство замены фильтров (без открывания корпуса рециркулятора), удобство подключения рециркулятора к электросети (6-метровый кабель с вилкой УЗО), защитная функция — отключе-



**Рис. 3. Расположение элементов внутри рециркулятора:**  
 1 — вентилятор; 2 — световая решетка; 3 — термостат;  
 4 — УФ-лампа; 5 — ЭПРА; 6 — вентиляционная камера;  
 7 — зона облучения; 8 — концевой микропереключатель;  
 9 — автоматический выключатель; 10 — крышка вентиляционной камеры;  
 11 — крышка зоны облучения; 12 — защелка; 13 — шильдик

ние питания рециркулятора при открытии двери, возможность экстренного отключения рециркулятора.

Рециркулятор работает в трех режимах, выбираемых вручную на экране панели оператора.

Функции панели оператора:

- визуальная сигнализация на панели оператора о неисправности УФ-лампы;
- учет времени наработки и числа включений УФ-лампы;
- визуальная сигнализация на панели оператора о превышении времени наработки УФ-лампы;
- визуальная сигнализация на панели оператора о перегреве;

- визуальная информация о текущем состоянии рециркулятора;
- возможность просмотра истории сообщений.

Для визуализации определенной страницы необходимо нажать соответствующую кнопку на дисплее.

Причина сигнала:

"Предупреждение": наработка лампы  $\geq 11\ 000$  ч;

"Авария": неисправен вентилятор, перегрев зоны облучения, открытие двери, наработка лампы  $\geq 12\ 000$  ч, неисправна лампа.

Причины автоматического аварийного отключения: неисправна лампа, неисправен вентилятор, открыта дверь, наработка лампы  $\geq 12\ 000$  ч.

Переключение режимов работы рециркулятора: доступен любой режим, если наработка лампы  $\leq 12\ 000$ ч.

Рециркулятор невозможно включить, если активно одно из сообщений:

Авария! Лампа неисправна!;

Авария! Перегрев! Лампа исчерпала свой ресурс!;

Авария! Перегрев!; Авария! Открыта дверь!;

Нарработка лампы  $\geq 12\ 000$  ч.

Рециркулятор требует применения специальных мер для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и должен быть установлен и введен в эксплуатацию в соответствии со специальными требованиями (табл. 2) [8, 9].

Применение мобильных радиочастотных средств связи может оказывать воздействие на рециркулятор.

Использование кабелей, не указанных в перечне, за исключением кабелей, поставляемых

Таблица 2

**Обеспечение электромагнитной совместимости**

Помеха	Соответствие	Указания
Радиопомехи по СИСПР 11	Группа 1	Рециркулятор использует радиочастотную энергию только для выполнения внутренних функций. Уровень эмиссии радиочастотных помех является низким и, вероятно, не приведет к нарушениям функционирования расположенного вблизи электронного оборудования
Радиопомехи по СИСПР 11	Класс В	Рециркулятор пригоден для применения в любых местах размещения, включая жилые дома и здания, непосредственно подключенные к распределительной электрической сети, питающей жилые дома
Гармонические составляющие потребляемого тока по МЭК 61000-3-2	Класс А	
Колебания напряжения и фликер по МЭК 61000-3-3	Соответствует	




изготовителем рециркулятора, может привести к увеличению электромагнитной эмиссии или снижению помехоустойчивости рециркулятора (табл. 3) [8, 9].

Рециркулятор не следует применять в непосредственной близости или во взаимосвязи с другим оборудованием и, если такое их применение является необходимым, должна быть

Таблица 3

## Помехоустойчивость

Помеха	Испытательный уровень	Указания
Электростатические разряды (ЭСР)	МЭК 61000-4-2 $\pm 2, \pm 4, \pm 8$ кВ — воздушный разряд; $\pm 2, \pm 4, \pm 6$ кВ — контактный разряд	Полы помещения должны быть выполнены из дерева, бетона или керамической плитки. Если полы покрыты синтетическим материалом, то относительная влажность должна составлять не менее 30 %
Наносекундные импульсные помехи	МЭК 61000-4-4 $\pm 2$ кВ — для линий электропитания; $\pm 1$ кВ — для линий ввода-вывода	Качество электрической энергии в электрической сети здания должно соответствовать типичным условиям коммерческой или больничной обстановки
Микросекундные импульсные помехи большой энергии	МЭК 61000-4-5 $\pm 0,5, \pm 1, \pm 2$ кВ — при подаче помех по схеме "провод—земля"; $\pm 0,5, \pm 1$ кВ — при подаче помехи "провод—провод"	
Провалы, прерывания и изменения напряжения во входных линиях электропитания	МЭК 61000-4-11 Провалы: $U < 5 \%$ , 0,5 периода (10 мс); $U = 40 \%$ , 5 периодов (100 мс); $U = 70 \%$ , 25 периодов (500 мс); Прерывания: $U < 5 \%$ , 250 периодов (5000 мс) ( $U$ — испытательный уровень от напряжения электропитания переменного тока до подачи помехи, %)	
Магнитное поле промышленной частоты (50/60 Гц)	МЭК 61000-4-8 3 А/м	Уровни магнитного поля промышленной частоты следует обеспечить в соответствии с типичными условиями коммерческой или больничной обстановки
Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями	МЭК 61000-4-6 3 В (среднеквадратичное значение)	Расстояние между используемой мобильной радиотелефонной системой связи и любым элементом рециркулятора, включая кабели, должно быть не меньше рекомендуемого пространственного разнеса: $d = 1,2\sqrt{P}$
Излучаемое радиочастотное электромагнитное поле	МЭК 61000-4-3 3 В/м в полосе от 80 МГц до 2,5 ГГц	$d = 1,2\sqrt{P}$ (при 80...800 МГц) $d = 2,3\sqrt{P}$ (при 800 МГц...2,5 ГГц). Напряженность поля при распространении радиоволн от стационарных радиопередатчиков по результатам наблюдений за электромагнитной обстановкой, должна быть ниже уровня соответствия в каждой полосе частот. Помехи могут иметь место вблизи оборудования, маркированного знаком 





проведена верификация нормального функционирования рециркулятора в данной конфигурации.

Напряженность поля при распространении радиоволн от стационарных радиопередатчиков, такие как базовые станции радиотелефонных сетей (сотовых/беспроводных) и наземных подвижных радиостанций, любительских радиостанций, АМ и FM радиовещательных передатчиков, телевизионных передатчиков, не может быть определена расчетным путем с достаточной точностью. Для этого должны быть осуществлены практические измерения напряженности поля. Если измеренные значения в месте размещения рециркулятора больше применимых уровней соответствия, то следует проводить наблюдения за работой рециркулятора в целях проверки его нормального функционирования. Если в процессе наблюдения выявляется отклонение от нормального функционирования, то необходимо принять дополнительные меры: переориентировку или перемещение рециркулятора.

Вне полосы частот 150 кГц...80 МГц следует обеспечить напряженность поля менее 1 В/м. На частотах 80...800 МГц применяют большие значения напряженности поля. На распространение электромагнитных волн влияет поглощение или отражение от конструкций, объектов и людей.

Рециркулятор предназначен для применения в электромагнитной обстановке, при которой осуществляется контроль уровней излучаемых помех. Пользователь рециркулятора может избежать влияния электромагнитных помех, обеспечивая минимальный простран-

ственный разнос между портативными и подвижными радиочастотными средствами связи (передатчиками) и рециркулятором с учетом максимальной выходной мощности средств связи (табл. 4).

При определении рекомендуемых значений пространственного разнosa  $d$  для передатчиков с номинальной максимальной выходной мощностью, не указанной в таблице, в приведенные выражения подставляют номинальную максимальную выходную мощность  $P$  в ваттах, указанную в документации изготовителя передатчика.

Рециркулятор должен быть размещен в помещении и подключен к однофазной сети напряжением 220 В переменного тока частотой 50/60 Гц с обязательным заземляющим проводником. Рециркулятор передвижной, на подставке с колесиками, поэтому при окончательном размещении рециркулятора в помещении рекомендуется поставить колесики на тормоза.

При размещении рециркулятора учитывают необходимость свободного доступа к двери корпуса для проведения регламентных и ремонтных работ по замене лампы, обслуживанию фильтров, проверке состояния ЭПРА, контактов внутренней поверхности корпуса, где расположена лампа, а также свободного доступа к главному выключателю, расположенному на задней стенке рециркулятора.

Не следует располагать рециркулятор вблизи решеток вытяжной вентиляции. В этом случае большая часть очищенного рециркулятором воздуха будет удаляться через вытяжное окно, не успевая распространяться в помещении. Рециркулятор или устройства воздухо-

Таблица 4

Рекомендуемые значения пространственного разнosa между портативными и подвижными радиочастотными средствами связи и рециркулятором

Номинальная максимальная выходная мощность передатчика, Вт	Пространственный разнос, м, в зависимости от частоты передатчика		
	$d = 1,2\sqrt{P}$ в полосе 150 кГц...80 МГц	$d = 1,2\sqrt{P}$ в полосе 8...800 МГц	$d = 2,3\sqrt{P}$ в полосе 800 МГц...2,5 ГГц
0,01	0,12	0,12	0,23
0,1	0,38	0,38	0,73
1	1,2	1,2	2,3
10	3,8	3,8	7,3
100	12	12	23



спределения располагают таким образом, чтобы выходящая воздушная струя создавала для людей дискомфортные условия.

Рециркулятор рассчитан на непрерывную работу в помещении в течение рабочего времени.

Работа рециркулятора в присутствии людей обеспечивает снижение уровня микробной обсемененности воздуха в помещениях объемом до 1000 м<sup>3</sup>. В помещениях большего объема число рециркуляторов увеличивают пропорционально увеличению объема помещения.

Для обеспечения комфортных условий в помещениях, оборудованных рециркуляторами, следует соблюдать общепринятые правила воздухообмена, изложенные в СНиП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование".

Направление потока воздуха, создаваемого рециркулятором, по возможности должно совпадать с направлением основных конвективных потоков воздуха в помещении. (В отопительный сезон радиаторы отопления создают над собой восходящие воздушные потоки, распространяющиеся затем вдоль потолка и опускающиеся у противоположной стены помещения.)

При включении рециркулятора на ограниченный период времени минимальную продолжительность его работы  $T_{\text{мин}}$  определяют таким образом, чтобы обеспечивать как минимум однократное прохождение всего объема воздуха в помещения  $V_{\text{п}}$  через рециркулятор.

Например, для помещения объемом 500 м<sup>3</sup> рекомендуемая минимальная продолжительность работы  $T_{\text{мин}}$  рециркулятора АЭРОЛИТ 500:

— при работе в режимах 1 и 3 минимальной производительности  $Q_{\text{рец}} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ :  $T_{\text{мин}} = V_{\text{п}}/Q_{\text{рец}} = 500/500 = 1 \text{ ч}$ ;

— при работе в режимах максимальной производительности  $Q_{\text{рец}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ :  $T_{\text{мин}} = 0,5 \text{ ч}$ .

Режим работы рециркулятора выбирается в соответствии с табл. 1.

Целесообразно совмещать включение рециркулятора с проведением ежедневных уборок перед началом функционирования помещения, так как в процессе уборки может происходить интенсивное микробиологическое загрязнение воздуха.

Ввод рециркулятора в работу: подключить вилку кабеля питания рециркулятора к розетке ~220 В, 50 Гц; включить рециркулятор, нажав на главный выключатель б; выбрать на

экране панели оператора 2 режим работы рециркулятора на основе информации о режимах работы.

Запустить работу рециркулятора, нажав на экране панели оператора кнопку "ПУСК". После этого включится вентилятор и на экране появится надпись "Продувка". Спустя 2 мин надпись исчезнет, включится лампа и на экране появится надпись "Прогрев лампы". Спустя еще 2 мин надпись исчезнет, и рециркулятор переходит в выбранный режим работы. Если не касаться 10 мин панели оператора, то экран панели оператора переходит в режим ожидания.

Основной источник микробиологического загрязнения воздуха — люди. Один человек выделяет в окружающий воздух 2000 — 6000 микроорганизмов в час: при разговоре 800 частиц/мин, при чихании до 40 000, поэтому задача очистки воздуха актуальна и своевременна, особенно сейчас, когда весь мир борется с коронавирусом. Воздух, поверхности, воду необходимо очищать любыми доступными методами и способами, продлевая жизнь живым существам на всей планете.

### Библиографический список

1. **Микаева С.А.** Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. М.: Научтехлитиздат. 2004. 210 с.
2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 136 с.
3. **Микаева С.А.** Разработка и исследование технологии производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем. М.: МГУПИ, 2007. 286 с.
4. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки очистки воздуха // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 302—307.
5. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 150 с.
6. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.
7. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: РУСАЙНС, 2019. 186 с.
8. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.
9. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.

В.В. Бардушкин, д-р физ.-мат. наук, А.А. Кочетыгов, Ю.И. Шилева, канд. хим. наук,  
О.В. Воловликова, канд. техн. наук  
(Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва)  
E-mail: bardushkin@mail.ru

## Прогнозирование значений средних напряжений при фазовом переходе лед — вода в мезопористых структурах на основе кремния в интервале температур 233...273 К\*

*Построена теоретическая модель прогнозирования значений средних напряжений при плавлении воды, замерзшей в мезопористых структурах на основе кремния в интервале температур 233...273 К, возникающих из-за различий термических коэффициентов линейного расширения элементов неоднородности исследуемых материалов. Проведены численные модельные расчеты и исследованы зависимости значений компонент тензора средних напряжений от объемного содержания воды в матрице пористого кремния.*

*Theoretical model has been developed for predicting the average stress values during melting of water frozen in silicon-based mesoporous structures in the temperature range 233...273 K, caused by the difference in the thermal expansion coefficients of the heterogeneity elements in the materials studied. Numerical calculations were carried out using and dependences of the average stress tensor components on the volumetric water content in the mesoporous silicon matrix were investigated.*

**Ключевые слова:** пористый кремний, деионизированная вода, лед, матричный композит, термоупругие характеристики, тензор концентрации напряжений, средние напряжения, моделирование.

**Keywords:** porous silicon, deionized water, ice, matrix composite, thermoelastic properties, stress concentration tensor, average stresses, simulation.

### Введение

Мезопористые материалы (пористый кремний, анодные оксиды титана, ванадия и др.), синтез которых основан на принципах самоорганизации, представляют интерес в связи с разработкой электрохимических систем и совершенствованием технологий производства металл-ионных батарей и суперконденсаторов нового поколения [1—4]. При этом одна из важнейших задач в области исследования и разработки новых электродных материалов и совместимых с ними электролитов — подбор компонентов электрохимических устройств, позволяющий устранить основную проблему

существующих металл-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов — их пожароопасность.

Большая площадь межфазной поверхности электрод/электролит в таких структурах оказывает влияние на работоспособность металл-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов при пониженных температурах [5—6]. В первую очередь это касается низкотемпературного фазового поведения жидких электролитов, контактирующих с мезопористым материалом электрода. В частности, понижается температура плавления/замерзания жидких электролитов (по сравнению с жидкостями в объемном состоянии) [7].

Наряду с высокой удельной поверхностью определенный вклад в изменение температуры плавления частиц, заключенных в матрицу другого материала, вносит объемная плотность

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-70180 "Стабильность".



энергии деформации [8—11]. Данная энергетическая характеристика при повышении температуры, в свою очередь, зависит от средних по материалу значений напряжений, возникающих в исследуемых неоднородных структурах из-за различий термических коэффициентов линейного расширения элементов неоднородности. В связи с этим необходимо установить характер и степень влияния возникающих механических напряжений на стабильность мезопористых структур, контактирующих с жидкостями в условиях низких температур. Для определения вклада объемной плотности энергии деформации в изменение температуры фазового перехода твердое тело—жидкость в мезопористой матрице, предложена теоретическая модель расчета значений компонент тензора средних напряжений в структурах на основе пористого кремния с адсорбированной водой в интервале температур 233...273 К.

### Построение модели и проведение модельных расчетов

При решении задачи определения средних напряжений в матричных структурах от значений локальных напряжений элементов неоднородности необходимо учитывать термоупругие характеристики и объемное содержание включений в материале [12]. Локальные напряжения определяют с помощью безразмерного оператора концентрации напряжений  $K^\sigma(\mathbf{r})$  — тензора четвертого ранга, связывающего локальные (внутренние) напряжения  $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$  в каждом элементе неоднородности со средними по материалу значениями напряжений  $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$  [12, 13]:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3,$$

где  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор случайной точки среды.

Угловые скобки определяют процедуру статистического усреднения (по объему или по ориентациям кристаллографических осей кристаллитов). Для многокомпонентных композитов операция усреднения по объему для некоторой случайной величины  $b(\mathbf{r})$  сводится к суммированию [12, 14]:

$$\langle b(\mathbf{r}) \rangle = \sum_s V_s \langle b_s(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

где  $V_s$  — объемная концентрация компонента  $s$ -го типа;

$b_s(\mathbf{r})$  — соответствующая указанному компоненту случайная величина;

$$\sum_s V_s = 1.$$

Для реальных неоднородных сред оператор  $K^\sigma(\mathbf{r})$  является невырожденным. С помощью тензора, обратного  $K^\sigma(\mathbf{r})$ , рассчитаем усредненное напряженное состояние матричной структуры при изменении ее локальных напряжений.

Для приближений, учитывающих взаимодействие включений, оператор  $K^\sigma(\mathbf{r})$  можно получить, решая уравнение равновесия (систему дифференциальных уравнений второго порядка со случайными кусочно-однородными коэффициентами). Используя метод функций Грина, с помощью обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей и специально вводимого однородного тела сравнения, запишем выражение для  $K^\sigma(\mathbf{r})$  (индексы опущены) [12, 13]:

$$K^\sigma(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \times \langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (2)$$

где  $c(\mathbf{r})$  — тензор модулей упругости;

$$c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c;$$

$I$  — единичный тензор;

$g(\mathbf{r})$  — интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия.

Двойным штрихом определяется разность между величинами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначим верхним индексом "с".

Компоненты  $g_{ijkl}$  тензора  $g(\mathbf{r})$  вычислим следующим образом:

$$g_{ijkl} = a_{iklj}; \quad (3)$$

$$a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega,$$

где  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$  — элемент телесного угла в сферической системе координат;

$t_{il}^{-1}$  — элементы матрицы, обратной матрице

$T$  с элементами  $t_{il} = c_{iklj}^c n_k n_j$ ;

$n_k$  и  $n_j$  — компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения,  $k, j = 1, 2, 3$ .

Для эллипсоидальных включений с полуосями  $l_1, l_2$  и  $l_3$  компоненты вектора нормали определяют соотношениями

$$n_1 = l_1^{-1} \sin \theta \cos \varphi;$$

$$n_2 = l_2^{-1} \sin \theta \sin \varphi;$$

$$n_3 = l_3^{-1} \cos \theta.$$

По парам индексов  $i$  и  $j$ ,  $k$  и  $l$ , заключенных в выражении (3) для компонент  $g_{ijkl}$  тензора  $g(\mathbf{r})$  в круглые скобки, проводим операцию симметризации [14].

Мезопористые материалы (пористый кремний) представляют собой мембраны толщиной порядка 80 мкм со сквозными порами, форма которых близка к цилиндрической, однако при этом они могут изгибаться и ветвиться. Пористость материалов (объем пор, отнесенный к объему образца) составляет порядка 45 %, диаметр пор —  $(18 \pm 5)$  нм, расстояние между порами —  $(46 \pm 5)$  нм (по данным сорбционного анализа и растровой электронной микроскопии). Структуры образцов напоминают губку, при этом сквозные поры насыщены деионизированной водой. Понижение температуры образцов до 233 К приводит к замерзанию несвязанной воды в порах кремния.

Рассмотрим двухкомпонентные композиты вида "пористый кремний — лед" в окрестности температуры плавления льда, которая согласно экспериментальным данным дифференциальной сканирующей калориметрии составляет порядка 255 К [15]. Компонент первого типа — включения в форме ориентированных волокон льда; матрица — компонент второго типа — кремний.

Монокристаллический кремний, используемый для формирования мембран, — анизотропный материал с кубической кристаллической структурой. Для ненулевых элементов симметрической матрицы  $c$  тензора модулей упругости его монокристаллов выбрали значения, ГПа [14]:

$$c_{11} = c_{22} = 165,7; c_{12} = c_{13} = c_{23} = 63,9; \\ c_{44} = c_{55} = c_{66} = 79,6.$$

Для проведения модельных расчетов локальных упругих свойств композитов вида "пористый кремний—лед" использовали эффективные характеристики поликристаллического кремния, полученные методом самосогласования с помощью усреднения по всевозможным ориентациям кристаллографических осей кристаллитов кремния (с изотропной функцией распределения), сводящегося к интегрированию по всевозможным углам Эйлера. Была

организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров  $c^c$  тела сравнения брали значения тензора модулей упругости поликристаллического кремния (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения выбирали упругие характеристики поликристаллического кремния, полученные в приближении Хилла [12, 14]. Выход из итерационной процедуры осуществляли, когда максимальная разница между модулями  $c^c$  составляла менее 0,01 ГПа. При этом считали, что матрица  $c^c$ , полученная на последнем шаге итерационной процедуры, является матрицей эффективных модулей упругости поликристаллического кремния, используемой в дальнейших расчетах.

Такой же подход применяли и для нахождения значений элементов матрицы эффективных модулей упругости поликристаллического льда, используемой в дальнейшем при проведении модельных расчетов локальных упругих свойств композитов вида "пористый кремний — лед". Для льда гексагональной кристаллической структуры значения для ненулевых элементов симметрической матрицы  $c$  тензора модулей упругости его монокристаллов, ГПа [16]:

$$c_{11} = c_{22} = 14,7; c_{33} = 15,8; c_{12} = 7,4; \\ c_{13} = c_{23} = 6,0; c_{44} = c_{55} = 3,2; \\ c_{66} = 0,5(c_{11} - c_{12}) = 3,65.$$

Вычисленные таким образом значения элементов матрицы эффективных модулей упругости поликристаллического льда хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [17].

При построении модели прогнозирования локальных упругих свойств композитов считали, что сквозные поры представляют собой равные друг другу сильно вытянутые эллипсоиды вращения ( $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  — полуоси этих эллипсоидов). Полагали, что эллипсоиды ориентированы своей большей полуосью в пространстве композита в пяти различных направлениях относительно лабораторной прямоугольной системы координат, а именно, параллельно вертикальной оси  $Z$  (одно направление) и параллельно прямым, образующим равные углы со всеми координатными осями (четыре направления).





При проведении численных расчетов компонент оператора концентрации напряжений  $K^\sigma(\mathbf{r})$  полагали, что композиты имеют объемные содержания компонентов  $V_1$  и  $V_2$  ( $V_1 + V_2 = 1$ ), где индекс "1" относится к включениям льда, а "2" — к матрице кремния. В каждом из этих пяти направлений эллипсоидальные включения имеют одинаковые объемные концентрации  $V_1/5$ .

Для рассматриваемых композитов вида "пористый кремний — лед" соотношение (2) для оператора концентрации напряжений в компоненте  $s$ -го типа, с учетом (1), имеет следующий вид [12, 13]:

$$K_s^\sigma = c_s (I - g_s (c_s - c^c))^{-1} \times \left( \sum_i V_i c_i (I - g_i (c_i - c^c))^{-1} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $c_s$  и  $c^c$  — тензоры модулей упругости  $s$ -го компонента композита и однородного тела сравнения соответственно;

$g_s$  — тензор  $g(\mathbf{r})$   $s$ -го компонента композита, вычисляемый по соотношению (3).

При этом  $g_2$  соответствует матрице кремния ( $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ ),  $g_1$  — ориентированным эллипсоидальным включениям льда. У тензора  $g_1$  имеется пять различных ориентаций, согласованных с ориентациями эллипсоидов (в модельных расчетах большую полуось эллипсоидов принимали равной 4000, остальные — 1).

В качестве условия, приводящего к изменению напряженного состояния композита вида "пористый кремний — лед", рассматривали фактор температурного расширения включений льда и матрицы кремния. В этом случае локальные значения напряжений имеют вид [12, 18]:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = c_{ijkl}(\mathbf{r}) \alpha_{kl}(\mathbf{r}) \Delta T,$$

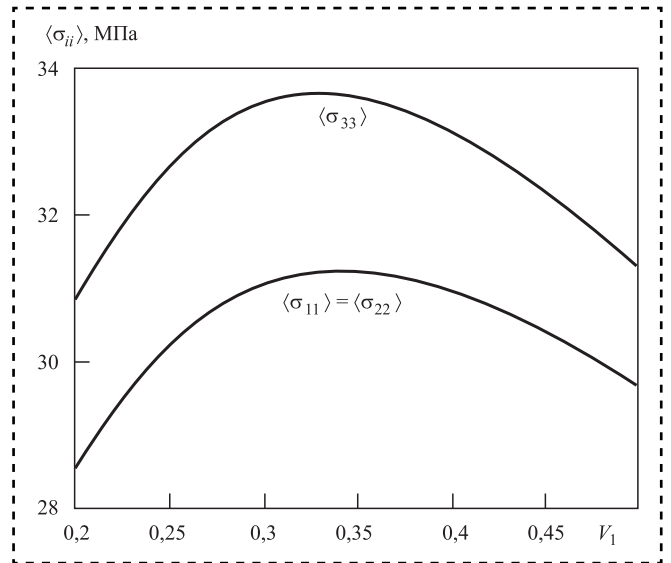
где  $\alpha_{kl}(\mathbf{r})$  — компоненты тензора температурного расширения,  $\alpha_{kl}(\mathbf{r}) = \alpha(\mathbf{r}) \delta_{kl}$ ;

$\alpha(\mathbf{r})$  — термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР),  $\alpha(\mathbf{r}) = \alpha_{\text{H}_2\text{O}}$  для включений льда,  $\alpha(\mathbf{r}) = \alpha_{\text{Si}}$  для матрицы кремния;

$\delta_{kl}$  — символ Кронекера;

$\Delta T$  — изменение температуры.

Тогда для отдельного элемента неоднородности  $s$ -го типа вклад его локального напряженного состояния в среднее напряженное состояние композита составит [18]:



Зависимости значений ненулевых компонент  $\langle \sigma_{ii} \rangle$  тензора средних напряжений  $\langle \sigma \rangle$  от объемного содержания ориентированных включений льда  $V_1$

$$\langle \sigma_s \rangle = (K_s^\sigma)^{-1} \sigma_s = (K_s^\sigma)^{-1} c_s \alpha_s \Delta T \delta_{kl}.$$

Среднее напряжение, вызванное термическим расширением элементов неоднородности, определим из соотношения [18]:

$$\langle \sigma \rangle = \left( \sum_s V_s (K_s^\sigma)^{-1} c_s \alpha_s \right) \Delta T \delta_{kl}. \quad (5)$$

Модельные вычисления ненулевых компонент  $\langle \sigma_{ii} \rangle$  тензора средних напряжений  $\langle \sigma \rangle$  выполняли при ТКЛР:  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 50,61 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{Si}} = 1,99 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $T = 243 \text{ K}$  [19].

На рисунке приведены расчетные зависимости значений средних напряжений для модельных композитов от объемного содержания включений льда  $V_1$ , выполненные по соотношению (5) при  $T \geq 233 \text{ K}$ ,  $\Delta T = 20 \text{ K}$ . В силу структуры рассматриваемых композитов (наличие вертикально ориентированных включений льда, а другие направления ориентаций волокон создают хаотически армированную структуру материала)  $\langle \sigma_{11} \rangle = \langle \sigma_{22} \rangle$ .

### Заключение

Кривые зависимости значений компонент  $\langle \sigma \rangle$ , вызванных нагревом материала, имеют ярко выраженные экстремумы при  $V_1 \approx 0,33$ .

Вид указанных кривых существенно отличается от поведения аналогичных кривых, описывающих зависимости компонент  $\langle \sigma \rangle$  для мате-



риалов на основе матриц анодного оксида алюминия с металлическими волокнами [10, 11, 20], но похож на вид кривых для материалов на основе матриц анодного оксида алюминия с волокнами поливинилиденфторида [21]. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании изделий из рассматриваемых материалов во избежание растрескивания кремниевой матрицы при термоциклировании.

Значения компоненты  $\langle \sigma_{33} \rangle$  тензора  $\langle \sigma \rangle$  при любом значении  $V_1$  больше соответствующих значений компонент  $\langle \sigma_{11} \rangle$  и  $\langle \sigma_{22} \rangle$ .

Полученные данные по средним напряжениям в композитах можно использовать при исследовании зависимости термодинамических свойств жидкостей, заключенных в мезопористых структурах от пористости  $V_1$ , в частности, при моделировании процессов плавления. Дальнейшие исследования термоупругих характеристик и температурных диапазонов стабильности рассматриваемых композитов с учетом предложенной модели позволят оптимизировать процессы получения и применения наноматериалов на основе пористого кремния.

### Библиографический список

1. Fang G., Zhou J., Pan A., Liang S. Recent Advances in Aqueous Zinc-Ion Batteries // ACS Energy Letters. 2018. Vol. 3. No. 10. P. 2480–2501. DOI: 10.1021/acscenergylett.8b01426.
2. Hydrated Layered Vanadium Oxide as a Highly Reversible Cathode for Rechargeable Aqueous Zinc Batteries / N. Zhang et al. // Advanced Functional Materials. 2019. Vol. 29. Iss. 10. P. 1807331. DOI: 10.1002/adfm.201807331.
3. Aluminum storage behavior of anatase TiO<sub>2</sub> nanotube arrays in aqueous solution for aluminum ion batteries / S. Liu et al. // Energy & Environmental Science. 2012. Vol. 5. Iss. 12. P. 9743–9746. DOI: 10.1039/C2EE22987K.
4. Ashuri M., He Q., Shaw L.L. Silicon as a potential anode material for Li-ion batteries: where size, geometry and structure matter // Nanoscale. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 74–103. DOI: 10.1039/C5NR05116A.
5. Цивадзе А.Ю., Кулова Т.Л., Скундин А.М. Фундаментальные проблемы литий-ионных аккумуляторов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2013. Т. 49. № 2. С. 149–154. DOI: 10.7868/S0044185613020083.
6. Кулова Т.Л., Скундин А.М. Проблемы низкотемпературных литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 61–88. DOI: 10.18500/1608-4039-2017-17-2-61-88.
7. Лукьянова Е.Н., Козлов С.Н. Особенности электропереноса в нанопористом кремнии и оксиде кремния с адсорбированной водой // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 11. С. 1–6.
8. Объемная плотность энергии деформации в анодном оксиде алюминия, пористозаполненном металлическими нитевидными нанокристаллами / Ю.И. Шиляева и др. // Журнал физической химии. 2013. Т. 87. № 11. С. 1889–1893. DOI: 10.7868/S0044453713100233.
9. Melting temperature of metal polycrystalline nanowires electrochemically deposited into the pores of anodic aluminum oxide / Yu.I. Shilyaeva et al. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2014. No. 16 (36). P. 19394–19401. DOI: 10.1039/c4cp02436b.
10. Шиляева Ю.И. Исследование особенностей фазовых переходов I рода в нитевидных нанокристаллах (In, Sn, Zn) в порах анодного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2015. 141 с.
11. Влияние термоупругих свойств компонентов на температуру плавления нитевидных наночастиц Cu, Ag и Au в матрице анодного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / В.В. Бардушкин и др. // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 6. С. 1030–1036. DOI: 10.7868/S0044453717060048.
12. Микромеханика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение) / В.И. Колесников и др. Ростов н/Д.: РГУПС, 2012. 288 с.
13. Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П. О прогнозировании распределенной локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 3. С. 11–17.
14. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
15. Characterization of Mesoporous Silicon Using DSC Thermoporometry / Y. Shilyaeva et al. // International Journal of Nanoscience. 2019. Vol. 18. No. 3&4. P. 1940073. DOI: 10.1142/S0219581X19990011.
16. Модули упругости и границы стабильности льдов и клатратных гидратов кубической структуры I / В.Р. Белослудов // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2001. Т. XLV. № 3. С. 45–50.
17. Schulson E.M. The Structure and Mechanical Behavior of Ice // JOM. 1999. Vol. 51. P. 21–27. DOI: 10.1007/s11837-999-0206-4.
18. Влияние термоупругих характеристик компонентов, формы и ориентации неизометричных включений на средние напряжения в матричных структурах / В.И. Колесников и др. // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 5. С. 43–47.
19. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
20. Влияние структуры и термоупругих свойств компонентов на средние напряжения в анодном оксиде алюминия с порами, заполненными металлическими нитевидными нанокристаллами / Ю.И. Шиляева и др. // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 7. С. 723–728. DOI: 10.7868/S0002337X13060134.
21. Влияние структуры и термоупругих характеристик компонентов на средние напряжения в анодном оксиде алюминия с нитевидными порами, заполненными поливинилиденфторидом / Г.Я. Красников и др. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2017. № 2. С. 45–50.



**М.В. Бойко**, канд. техн. наук, **И.В. Колесников**, д-р техн. наук  
(Ростовский государственный университет путей сообщения),  
**С.Ф. Ермаков**, д-р техн. наук  
(Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Республика Беларусь),  
**Т.Г. Бойко, А.А. Бичеров**  
(Ростовский государственный университет путей сообщения)  
E-mail: mikle-1@list.ru

## Формирование граничных смазывающих пленок в присутствии комплексообразующих присадок\*

*Рассмотрено формирование граничных смазывающих пленок на поверхности стали при трении в присутствии в смазочном материале веществ, образующих комплексные соединения с железом — дипиридил, о-фенантролином, 8-оксихинолином и этилендиаминтетрауксусной кислотой. Граничные слои, сформированные в присутствии комплексонов, повышают антифрикционные свойства смазочного материала при низких нагрузках. Установлено, что поверхностные пленки формируются преимущественно из молекул базового масла.*

*The formation of boundary lubricating films on the surface of steel during friction in the presence of substances forming complex compounds with iron — dipyridyl, o-phenanthroline, 8-hydroxyquinoline, and ethylenediaminetetraacetic acid, is considered. Boundary layers formed in the presence of complexones increase the antifriction properties of the lubricant at low loads. It has been established that surface films are formed predominantly from base oil molecules.*

**Ключевые слова:** смазочный материал, комплексные соединения, граничная пленка, антифрикционные свойства, бис(2-этилгексил)себацинат (диоктилсебацинат), ИК-спектроскопия.

**Keywords:** lubricant, complex compounds, boundary film, antifriction properties, bis(2-ethylhexyl)sebacate (dioctyl sebacate), IR spectroscopy.

### Введение

Повышение эффективности смазочных материалов — важная научно-техническая проблема, связанная с надежностью и долговечностью эксплуатации узлов трения. На данном этапе совершенствование смазочных материалов возможно только на качественно новом уровне. Характеристики традиционно используемых смазочных материалов не всегда в полной мере удовлетворяют требованиям современной промышленности, транспорта и других отраслей [1]. Необходимы смазочные материалы и другие родственные продукты, содержащие в качестве

смазочной основы или присадок новые высокоэффективные вещества [2—4].

В настоящее время существует три нерешенных проблемы в области смазки: определение типа молекул, которые могут эффективно входить в область контакта при скольжении; ориентация молекул в области контакта; влияние твердых поверхностей на молекулярную ориентацию жидкости в тонких смазочных пленках [5]. Обогащение поверхностного слоя молекулами присадок улучшило пленкообразующую способность смазочного материала и приводит к снижению на 61 % коэффициента трения. Упорядоченное расположение молекул — одна из причин уменьшения трения [5].

При химическом взаимодействии компонентов смазочного материала и металла струк-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-58-00004.



тура поверхностных пленок, образующихся на металле, влияет на смазочные свойства и контролируется балансом химического взаимодействия между присадками, базовым маслом и поверхностью [6, 7]. Присадки, имеющие полярную функциональную группу, взаимодействуют с оксидом металла в мягких условиях, а неполярные добавки — в более жестких условиях. Поверхность металла играет важную роль в трибохимических реакциях с участием смазочного материала. Поэтому присадки следует выбирать на основе химии поверхности в зависимости от условий смазки [7].

Повышение смазочной способности масел может быть достигнуто и путем увеличения ориентирующей способности самих рабочих поверхностей твердых тел, например, при нанесении на поверхности специальных углеродных покрытий-ориентантов, приводящих к образованию на них высокоориентированных граничных слоев, повторяющих высокоупорядоченную структуру, которая задается поверхностью покрытия [8, 9]. Анализ процесса адсорбции масел на поверхностях трения, способствующих их ориентации, показал, что покрытия-ориентанты обеспечивают значительную структурную упорядоченность молекул в граничном слое, в то время как аморфные покрытия не оказывают ориентирующего влияния на граничный слой.

Использование в качестве присадок веществ, образующих прочные химические связи с поверхностью, перспективно. Такие соединения способствуют образованию на поверхностях трения прочно удерживающихся адсорбционных слоев, предотвращающих непосредственный контакт твердых тел, препятствующих схватыванию и появлению критических состояний трибосистем. Наиболее прочные химические связи с катионами железа образуют вещества, используемые для количественного определения содержания переходных металлов в природных объектах, называемые комплексодами. В силу специфических структурных особенностей комплексонов можно ожидать, что они будут создавать в процессе трения условия, благоприятные для образования поверхностей, обладающих

высокой ориентацией, что обеспечит наилучшие смазочные свойства и работоспособность граничных слоев в более широком интервале температур и нагрузок [10].

**Цель работы** — определение влияния некоторых комплексонов на формирование граничных слоев в среде синтетического сложноэфирного масла — бис(2-этилгексил)себацата, которое обладает хорошими смазывающими свойствами, является биоразлагаемым, производится из возобновляемого сырья, что определяет перспективность его использования при производстве смазочных материалов.

### **Методика проведения эксперимента и полученные результаты**

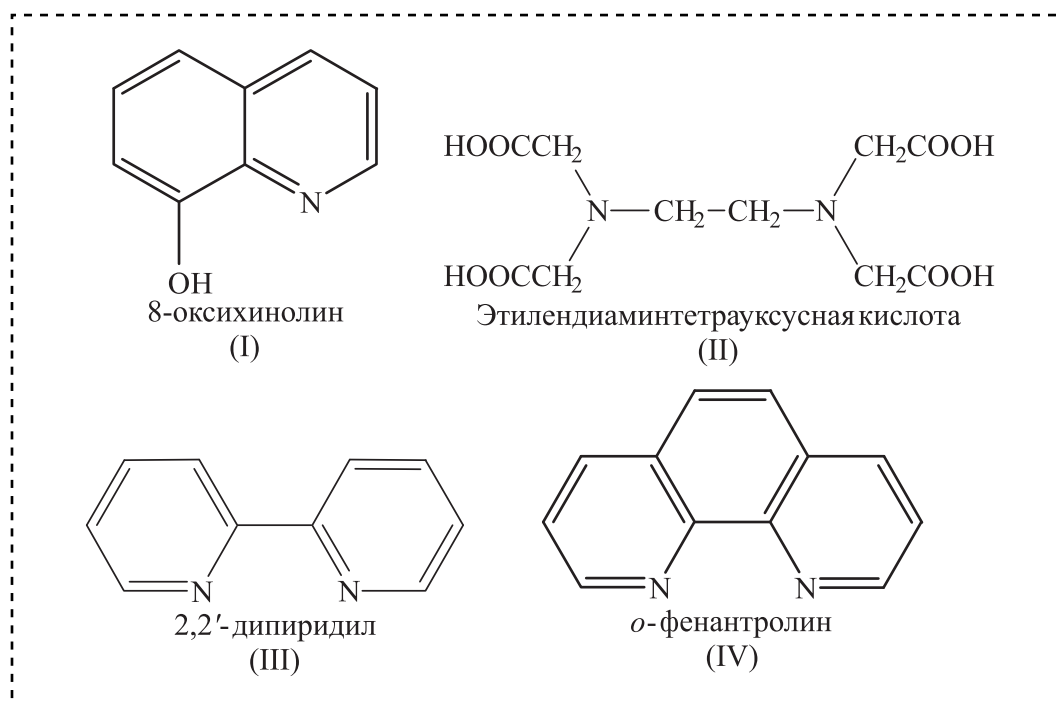
Трибологические испытания смазочных материалов проводили на трибометре по схеме "три пальца по стальному диску". Пальцы и диски изготовлены из стали марки 30X13,  $Ra$  0,7...0,8. Диаметр каждого пальца составлял 1 см, а расстояние от центра диска до середины дорожки трения — 35 мм. Устанавливали начальную нагрузку на пальцы 1 МПа и повышали ее ступенчато через каждый час на 1 МПа до появления нестабильного режима трения или резкого повышения коэффициента трения. Скорость скольжения составляла 0,5 м/с для всех испытаний.

Закономерности изменения химических связей в поверхностной антифрикционной пленке изучали методом инфракрасной Фурье-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (ИК-спектроскопии НПВО) на спектрометре Nicolet 380.

Наличие пленки на поверхности трения подтверждали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss EVO-18 MA укомплектованного датчиками BSD и SE. Ускоряющее напряжение варьировали от 5 до 15 кВ. Для изучения поверхностей трения методом РЭМ перед исследованием излишки смазочного материала удаляли растворителем (нефрасом).

Испытания проводили с базовым маслом бис(2-этилгексил)себацатом (диоктилсеба-





**Рис. 1. Комплексные соединения с железом**

цинатом — ДОС) и присадками, способными образовывать прочные комплексные соединения с железом (комплексоны) (рис. 1).

После трибологических испытаний исходного и модифицированных комплексонами масел на поверхностях трения наблюдали образование окрашенных пленок (рис. 2 на стр. 3 обложки). В смазочной среде без присадок формируются граничные слои золотисто-коричневого цвета (рис. 2, *а*), в присутствии дипиридила (III) дорожка трения приобретает красный оттенок (рис. 2, *б*), а при добавлении *o*-фенантролина (IV) — сине-фиолетовый (рис. 2, *в*). Поверхность трения серого цвета образуется при модифицировании масла 8-оксихинолином (I) и этилендиаминтетрауксусной кислотой (II) (рис. 2, *г*). Цвет пленок обусловлен образованием окрашенных продуктов взаимодействия комплексонов и железа.

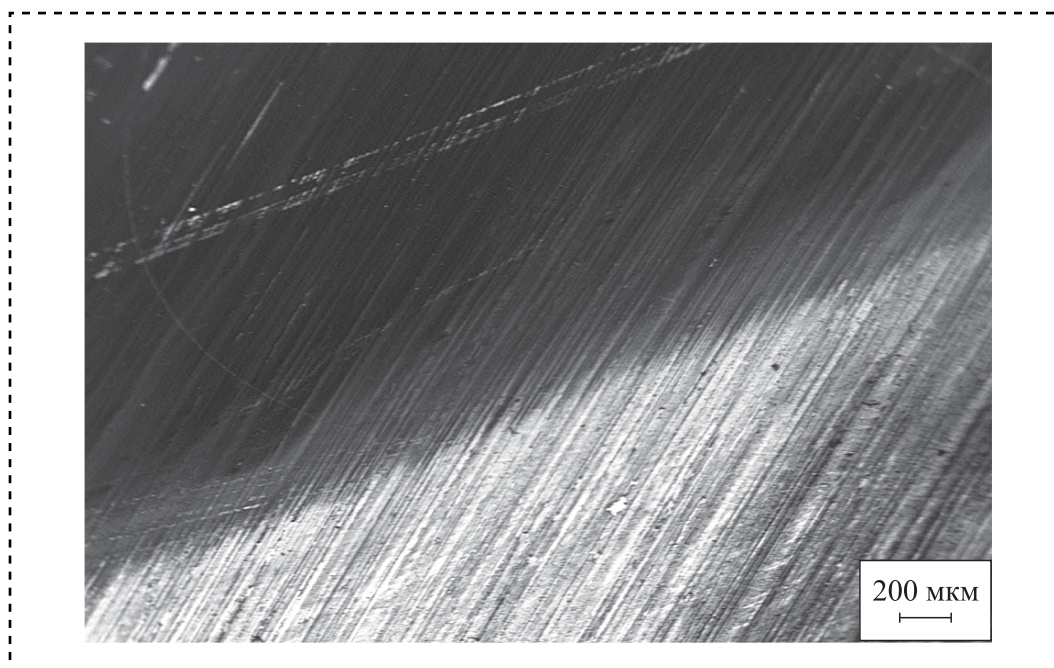
Исследование поверхности трения сформированной в масле, модифицированном *o*-фенантролином (IV), методом растровой электронной микроскопии показало наличие пленки органической природы, которая не смывается растворителем и прочно химически связана с металлической поверхностью (рис. 3).

Трибологические свойства масел с присадками зависят от нагрузки. Так, при 1 МПа все комплексоны способствуют снижению коэффициентов трения (рис. 4, *а* на стр. 3 обложки). Наибольшую эффективность показали вещества (I), (II) и (IV), причем антифрикционные свойства масел, модифицированных этими присадками, практически одинаковые. За счет химического взаимодействия с металлом комплексоны создают граничную пленку органической природы, которая лучше, чем исходная поверхность, смачивается маслом, что приводит к снижению коэффициентов трения.

Увеличение нагрузки на узел трения до 3 МПа приводит к тому, что коэффициенты трения в маслах, модифицированных практически всеми комплексонами, становятся близкими к значениям в исходном масле ДОС (рис. 4, *б* на стр. 3 обложки). При этом в присутствии веществ (I)—(III) режим трения становится менее стабильным.

Нестабильность коэффициента трения вызвана процессами истирания граничных слоев, образованных комплексными соединениями, и удалением продуктов износа из зоны трибоконтакта. При повышенных нагрузках





**Рис. 3.** РЭМ изображение поверхности трения, сформированной в среде ДОС + 0,1 % *o*-фенантролина (IV)

происходит замена граничных слоев, сформированных из продуктов взаимодействия комплексонов с железом на поверхностные пленки, состоящих из молекул базового масла.

Модификация ДОСа *o*-фенантролином повышает максимальную нагрузочную способность смазочного материала с 3,5 до 4,5 МПа. Среди изученных соединений *o*-фенантролин обладает наиболее сильными основными свойствами и является наименее полярным веществом. За счет олеофильности молекул *o*-фенантролина его комплексы с железом растворяются в смазочном материале, способствуя сглаживанию микрорельефа и формированию поверхностных пленок с большей несущей способностью.

Исследование поверхностей трибосопряжения методом ИК-спектроскопии НПВО показало, что поверхностные пленки, сформированные в среде ДОС, модифицированном комплексоном, идентичны тем, которые формируются в немодифицированном смазочном материале (рис. 5 на стр. 3 обложки).

Отсутствие в спектрах полос поглощения, отвечающих комплексам железа и комплексоном, свидетельствует о том, что толщина граничной пленки больше проникающей способности инфракрасного излучения, зависящей от длины волны и составляющей в среднем

несколько микрометров. Полученные данные позволяют предположить, что комплексоны образуют мономолекулярный адсорбционный слой, поверх которого формируется граничная поверхностная пленка из молекул ДОСа. Отсутствие полос поглощения комплексонов в спектрах поверхностных пленок свидетельствует о том, что они участвуют только в процессах образования адсорбционных комплексов с железом, а дальнейшие трибохимические реакции, приводящие к росту граничной пленки, протекают с участием молекул смазочной основы.

### Выводы

1. При трении происходит взаимодействие металла с комплексообразующими присадками, в результате образуются адсорбированные на поверхности окрашенные комплексные соединения железа.

2. Граничные слои, сформированные в присутствии комплексонов, повышают антифрикционные свойства смазочного материала при низких нагрузках. При повышенных нагрузках происходит замена граничных слоев, сформированных из комплексонов, на поверхностные пленки, состоящие из молекул базового масла.

3. Исследование поверхности методом ИК-спектроскопии НПВО показало, что гра-



ническая пленка формируется преимущественно из молекул базового масла. Продукты химического взаимодействия между комплексонами и металлом образуют на поверхностях трения монослой, толщина которого не позволяет произвести его исследование методом ИКС НПВО.

### Библиографический список

1. **Перспективные** методы поверхностной обработки деталей машин / под ред. Г.В. Москвитина. М.: Ленанд, 2019. 448 с.
2. **Трибология**. Состояние и перспективы: В 4 т. / гл. ред. И.Г. Горячева и М.А. Броновец. Т. 2. Смазка и смазочные материалы / под ред. С.М. Захарова и И.А. Буяновского. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. 504 с.
3. **Straffelini G.** Friction and Wear. Methodologies for Design and Control. Switzerland: Springer Nature, 2015. 283 p.
4. **Qiu M., Chen L., Li Y., Yan J.** Bearing Tribology. Principles and Applications. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. 332 p.
5. **Zhang S., Qiao Y., Liu Y., Ma L., Luo J.** Molecular behaviors in thin film lubrication—Part one: Film formation for different polarities of molecules // Friction. Vol. 7. I. 4.

2019. P. 372–387. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0287-1>.

6. **Бойко М.В., Колесников И.В., Бойко Т.Г., Бичеров А.А.** Кинетика формирования антифрикционной пленки в среде подсолнечного масла // Трение и износ. Т. 40. № 6. 2019. С. 700–705.
7. **Mori S.** Chemical aspect for advanced lubricants // Torai-baro-jisuto/Journal of Japanese Society of Tribologists. Vol. 64. I. 3. 2019. P. 150–157.
8. **Буяновский И.А., Левченко В.А., Игнатъева З.В., Матвеев В.Н.** Наноструктурированные углеродные покрытия-ориентанты и их взаимодействие с граничными смазочными слоями // Трение и износ. Т. 30. № 6. 2009. С. 569–574.
9. **Буяновский И.А., Игнатъева З.В., Левченко В.А., Матвеев В.Н.** Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел // Трение и износ. Т. 29. № 4. 2008. С. 375–381.
10. **Булгаревич С.Б., Бойко М.В., Фейзова В.А., Акимова Е.Е.** Влияние давления на протекание химических реакций в зоне непосредственного фрикционного контакта в системах с избирательным переносом // Трение и износ. Т. 32. № 3. 2011. С. 207–213.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



## СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

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

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

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

**ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ**

по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)

**Е.И. Воробьев**, д-р техн. наук

(Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодрава),

**К.О. Моргуненко**

(МИРЭА — Российский технологический университет, Москва),

**Е.Е. Конева**

(Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодрава)

E-mail: evgeniv36@mail.ru

## Построение движений манипуляторов в двуруких робототехнических системах при сборке цилиндрических соединений\*

*Рассмотрена задача построения движений манипуляторами с пятью степенями свободы при захвате цилиндрической детали, перенесения ее в заданное положение для соединения деталей. Построены циклограммы движения манипуляторов при сборке.*

*The problem of constructing movements with manipulators with five degrees of freedom when capturing a cylindrical part, transferring it to a given position for the process of connecting parts are considered. Cyclograms of movement of manipulators during assembly are constructed.*

**Ключевые слова:** построение движений манипуляторов, двурукая робототехническая система, сборка.

**Keywords:** construction of manipulator movements, two-handed robotic system, assembly.

### Введение

В серийном производстве для сборки цилиндрических соединений применяют автоматические сборочные линии, содержащие роботы и специальные сборочные устройства, а в мелкосерийном и индивидуальном — сборочные центры на основе специальных сборочных роботов.

Сборочный центр характеризуется высокой концентрацией операций и оборудования в ограниченном пространстве, поэтому для построения движений манипуляторов необходимо знать в каждый момент времени значения относительных и абсолютных положений их звеньев.

Обычно сборочный центр содержит от одного до нескольких сборочных и вспомогательных манипуляторов, одну сборочную позицию и транспортно-ориентирующие средства подачи деталей.

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00775.

При оснащении сборочного манипулятора адаптивным устройством для соединения деталей можно сократить общее время цикла. К сокращению общего времени цикла приводит также совмещение движений манипуляторов при перенесении собираемых деталей.

Вопросы роботизированной сборки в машиностроении хорошо изучены [1–6]. Однако задачи построения алгоритмов управления манипуляторами при захвате и переносе деталей требуют отдельного рассмотрения ввиду значительного времени для их выполнения.

Рассмотрим задачу построения движений манипуляторов в робототехнической системе сборки с двумя манипуляторами порталного типа и циклограммы их движения.

### Определение относительных положений звеньев манипуляторов

Для построения программных движений манипуляторов порталного типа решим за-

дачу об определении относительных положений звеньев манипулятора с пятью степенями свободы при захвате цилиндрической детали.

Манипулятор содержит три поступательных и две вращательных кинематические пары (рис. 1).

Со звеньями манипулятора свяжем системы координат следующим образом: оси системы координат звеньев 1, 2, 3 параллельны осям неподвижной системы координат  $OXYZ$ , со звеном 4 свяжем систему координат  $O_4X_4Y_4Z_4$ , направив ось  $Z_4$  параллельно оси  $OZ$ , а ось  $X_4$  параллельно оси пары  $O_5$ , со звеном 5 свяжем систему координат  $O_5X_5Y_5Z_5$ , направив ось  $X_5$  вдоль оси пары  $O_5$ , а ось  $Z_5$  по оси звена 5 — схвата манипулятора (рис. 2).

Положение цилиндрической детали зададим координатами точки, расположенной на оси детали и направляющими косинусами оси детали в неподвижной системе координат.

При решении обратной задачи о положениях манипулятора имеем в виду, что захват цилиндрической детали может проводиться схватом робота двумя разными способами с торца и сбоку.

Цилиндрические детали для сборки — втулка и цилиндрический штифт — в загрузочное устройство подаются в положении, когда ось детали параллельна оси  $OZ$  неподвижной системы координат.

Координаты контролируемой точки схвата робота  $Q_5$  найдем по формуле:

$$[X_5] = L_{03} + L_{34}L_4 + L_{45}L_5, \quad (1)$$

где  $L_4, L_5$  — длины звеньев 4 и 5;

$L_{34}, L_{45}$  — матрица перехода от системы  $i$  к системе  $i - 1$  ( $i = 3, 4$ );

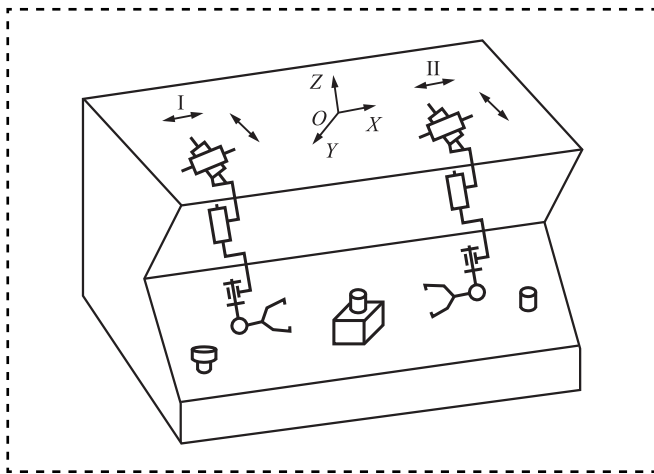


Рис. 1. Система сборки цилиндрических соединений

$L_{03}$  — единичная матрица перехода от системы  $X_3Y_3Z_3$  к системе  $OXYZ$ .

Причем

$$L_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_5 & -\sin \varphi_5 \\ 0 & \sin \varphi_5 & \cos \varphi_5 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$L_{34} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 & 0 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перемножив матрицы в формуле (1) с учетом выражений (2), получим координаты точки  $K_5$  схвата в неподвижной системе координат:

$$X_5 = S_1 + L_5 \sin \varphi_4 \sin \varphi_5;$$

$$Y_5 = S_2 \pm b_i - L_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_4 \quad (i = 1, 2); \quad (3)$$

$$Z_5 = S_3 + l_4 + l_5 \cos \varphi_5,$$

где  $b_i$  — смещение стойки манипуляторов от начала системы  $OXYZ$  по оси  $Y$ ;

$S_1, S_2, S_3$  — перемещения.

Направление движения схвата определяют матрицей ориентации, связанной с ним системы координат  $K_5X_5Y_5Z_5$ :

$$L_{05} = L_{04}L_{45}. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) матрицы, получим:

$$L_{05} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 \cos \varphi_5 & \sin \varphi_4 \sin \varphi_5 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 \cos \varphi_5 & -\cos \varphi_4 \sin \varphi_5 \\ 0 & \sin \varphi_5 & \cos \varphi_5 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$L_{05} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}.$$

При захвате детали с торца ось  $Z_5$  схвата становится направленной вдоль оси  $OZ$ , т.е. элементы третьего столбца матрицы (5) соответственно равны:

$$\alpha_{13} = 0; \quad \alpha_{23} = 0; \quad \alpha_{33} = 1,$$

откуда  $\cos \varphi_5 = 1; \varphi_5 = 0; \sin \varphi_4 = 0; \varphi_4 = 0$ .

При захвате детали сбоку ось  $Z_5$  перпендикулярна к оси  $OZ$  и третий столбец матрицы (5) имеет вид:

$$\alpha_{13} = 0; \quad \alpha_{23} = 1; \quad \alpha_{33} = 0,$$

откуда  $\cos \varphi_5 = 0; \varphi_5 = \pi/2; \varphi_4 = 0$ .



## Построение законов движения по управляемым координатам

Движение по управляемым обобщенным координатам манипуляторов можно построить, имея их значения в начале и в конце движения, после решения обратной задачи о положениях манипулятора.

Зная начальные и конечные значения обобщенных координат манипулятора, можно построить процесс изменения их во времени.

Построим эти движения для линейных координат, время изменения которых в большинстве случаев максимально, используя синусоидальный закон ускорения:

$$\ddot{S}(t) = \frac{\dot{S}_{\max}\pi}{2\Delta S} \left( \frac{\dot{S}_{\max}\pi t}{\Delta S} \right), \quad (6)$$

где  $\Delta S$  — разность между начальными и конечными координатами;

$\ddot{S}$  — вторая производная по времени от перемещений;

$\dot{S}$  — скорость движения по координате.

Закон изменения скорости по координате находим путем интегрирования выражения (6):

$$\dot{S}(t) = \frac{\dot{S}_{\max}}{2} \left[ 1 - \cos \frac{\dot{S}_{\max}\pi t}{\Delta S} \right]. \quad (7)$$

Закон изменения перемещения в линейных координатах находим путем интегрирования уравнения (7):

$$S(t) = \frac{1}{2} \left[ \dot{S}(t) - \frac{\Delta S}{\pi} \sin \left( \frac{\dot{S}_{\max}\pi t}{\Delta S} \right) \right]. \quad (8)$$

Максимальная скорость относительного перемещения по линейным координатам исходя из технологических соображений — 0,5...1 м/с.

Максимальное линейное ускорение определим по формуле (6).

Время перехода из начального положения в конечное находим из формулы (8):

$$T = \frac{2\Delta S}{\dot{S}_{\max}}. \quad (9)$$

Для угловых перемещений законы изменения обобщенных координат могут быть найдены по аналогичным формулам с заменой обозначений  $S$  на  $\varphi$ .

Зная времена переходов по обобщенным координатам, построим циклограмму движения для обоих манипуляторов.

## Циклограммы движения манипуляторов

### Циклограмма движения манипулятора I.

1. Переход из начального положения в опорную точку  $A_1$  на оси втулки.
2. Движение в точку  $A_2$  захвата втулки.
3. Зажим втулки.
4. Возврат схвата со втулкой в точку  $A_1$ .
5. Перенос втулки в положение сборки в точку  $A_3$ .

### Циклограмма движения манипулятора II.

1. Переход из начального положения в опорную точку  $A_4$  на линию оси штифта.
  2. Движение по оси штифта в точку  $A_5$  захвата штифта.
  3. Захват штифта.
  4. Перенос штифта в точку  $A_4$  на оси штифта.
  5. Перенос штифта в точку  $A_6$  на линию сборки.
  6. Перемещение штифта по линии сборки до соединения со втулкой.
  7. Освобождение штифта манипулятором I.
  8. Перенос схвата манипулятора в точку  $A_4$ .
- Перемещение собранного изделия манипулятором на конвейер.

Перемещение втулки манипулятором I в точки  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и перемещение штифта в точки  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_6$  может быть осуществлено одновременно, при этом сокращается общее время цикла и повышается производительность сборочного комплекса.

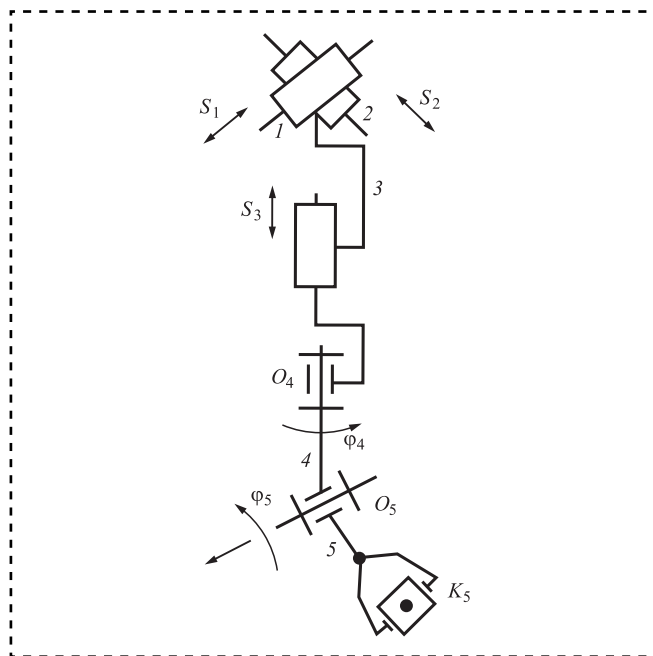


Рис. 2. Манипулятор



### Ограничения контактных сил при сборке

При сборке деталей с минимальным зазором одно из важных требований — выполнение условий ограничения контактных сил, возникающих при соединении деталей.

Это условие может быть выполнено при ограничении осевых сил при движении штифта во втулке.

Определим силу, необходимую для движения штифта во втулке для случаев одноточечного и двухточечного контактов (рис. 3).

Осевая сила  $\bar{Q}$ , приложенная к штифту, направлена по оси втулки.

Для одноточечного контакта имеем из условия проекции сил на ось втулки:

$$-Q + fN_1 \cos \gamma + N_1 \sin \gamma = 0;$$

$$N_1 = \frac{Q}{f \cos \gamma + \sin \gamma}, \quad (10)$$

где  $f$  — коэффициент трения;

$\gamma$  — угол наклона штифта к оси втулки.

Для двухточечного контакта имеем из условий равновесия штифта:

$$N_2 = N_1 \cos \gamma + fN_1 \sin \gamma;$$

$$Q = fN_1 \cos \gamma + N_1 \sin \gamma + fN_2, \quad (11)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — нормальные реакции в точках контакта штифта с поверхностью втулки.

Из уравнения (11) имеем:

$$N_2 = N_1 (\cos \gamma + f \sin \gamma).$$

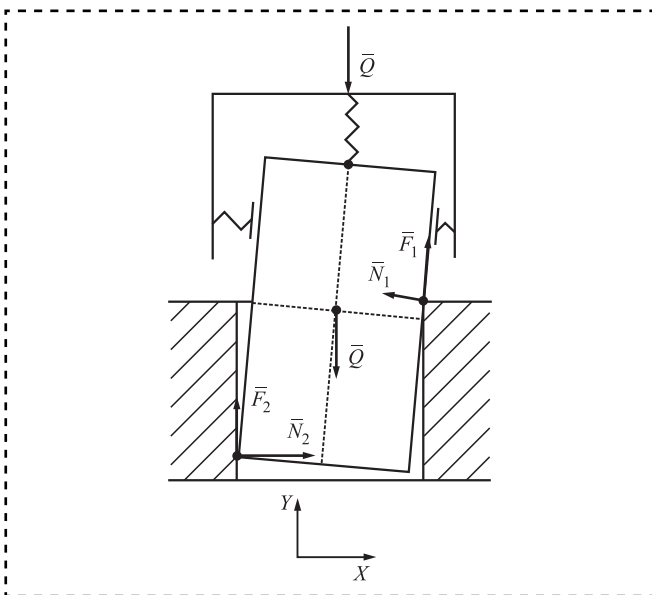


Рис. 3. Схема сил при сборке цилиндрических соединений

Так как  $f \sin \gamma \approx 0$  ввиду малого угла  $\gamma$ , то

$$N_2 = N_1 \cos \gamma, \quad (12)$$

тогда

$$Q = N_1 (2f \cos \gamma + \sin \gamma);$$

$$N_1 = \frac{Q}{2f \cos \gamma + \sin \gamma};$$

$$N_2 = \left( \frac{Q}{2f \cos \gamma + \sin \gamma} \right) \cos \gamma.$$

Ввиду малого угла  $\gamma$   $\cos \gamma \approx 1$ , тогда  $N_1 = N_2$ :

$$N_1 + N_2 = 2N = \frac{2Q}{2f \cos \gamma + \sin \gamma}.$$

Осевая сила, допустимая при сборке с учетом ограничения контактных сил:

$$Q = N (2f \cos \gamma + \sin \gamma), \quad (13)$$

где  $N$  — заданная допустимая сила в точке контакта.

### Заключение

Для сборки цилиндрических соединений число степеней свободы сборочных манипуляторов при произвольном расположении подающих устройств должно быть не меньше пяти.

При специальном расположении подающих устройств число степеней свободы манипуляторов может быть уменьшено.

Для ограничения контактных сил сборки необходимо ограничивать осевую силу при совмещении деталей.

### Библиографический список

1. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов. М.: Кнорус, 2016. 494 с.
2. Воробьев Е.И., Козырев Ю.Г., Царенко В.И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
3. Козырев Ю.Г. Установка захватных устройств и инструментов на конечном звене манипулятора при сборке изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 12. С. 11—21.
4. Гибкие сборочные системы / под ред. А.М. Покровского. М.: Машиностроение, 1988. 400 с.
5. Лебедевский М.С., Вейц В.Л., Федотов А.И. Научные основы автоматической сборки. Л.: Машиностроение, 1985. 316 с.
6. Кузнецова С.В., Симаков А.Л., Варганов М.В., Зинина И.Н. Синтез управления процессом адаптации детали при сборке методом обратной задачи динамики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 104—111.



**В.С. Кочергин, В.В. Куц, д-р техн. наук, М.С. Разумов, канд. техн. наук**  
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск),  
E-mail: koshergin@mail.ru

## Методика определения минимально допустимого и максимально возможного подъема на зуб при проектировании протяжек для обработки гранных отверстий со стороны более 60 мм

*Представлена методика определения минимально допустимой подачи и максимально возможного подъема на зуб. С учетом того, что с уменьшением толщины срезаемого слоя металла удельная сила резания возрастает, для уменьшения силы протягивания при конструировании протяжек необходимо стремиться выбирать максимально возможный подъем на зуб.*

*The methodology for determining the minimum allowable feed per tooth and maximum possible tooth lift is presented. Given the fact that with a decrease in the thickness of the metal layer being cut, the specific cutting force increases, in order to reduce the pulling force when designing broaches, it is necessary to strive to choose the maximum possible tooth lift.*

**Ключевые слова:** протягивание, подача на зуб, протяжка, методика.

**Keywords:** pulling, tooth feed, broaching, methodology.

Подъем на зуб  $S_z$  — важный фактор при работе протяжки. При больших значениях  $S_z$  протяжка получается короткой, при этом сокращается стоимость ее изготовления и повышается производительность процесса протягивания. Однако при увеличении подъема на зуб возрастает сила, необходимая для протягивания. При увеличении подъема на зуб увеличивается объем металла, снимаемого каждым режущим зубом протяжки, и пространство стружечной канавки может оказаться недостаточным для его размещения. С уменьшением толщины срезаемого слоя металла удельная сила резания возрастает. Все эти обстоятельства учтены при разработке приведенных ниже алгоритмов.

### Определение минимально допустимой подачи черновых зубьев

На первом шаге определения минимального подъема на зуб из условия обеспечения допустимых удельных контактных нагрузок необходимо:

из исходных данных для проектирования протяжек вычленить точностные характери-

стики и параметры шероховатости протягиваемой поверхности, материал заготовки и диапазон его твердости, состояние протягиваемой поверхности;

выбрать передний угол для режущих зубьев;

определить группы обрабатываемости материала заготовки, группы качества протягиваемой поверхности, марку инструментального материала для рабочей части протяжки и допустимое контактное напряжение (рис. 1).

На следующих четырех шагах алгоритма ищем поправочные коэффициенты на удельные контактные нагрузки на  $1 \text{ мм}^2$  передней поверхности режущих зубьев протяжек в зависимости от: группы обрабатываемости, состояния и твердости материала заготовки; вида СОЖ и ее состава; группы качества протягиваемой поверхности; способа разделения стружки. Следующий шаг алгоритма дает возможность рассчитать общий поправочный коэффициент  $K$  на удельные контактные нагрузки.

На следующем шаге алгоритма рассчитываем удельные контактные нагрузки с использованием математических моделей:

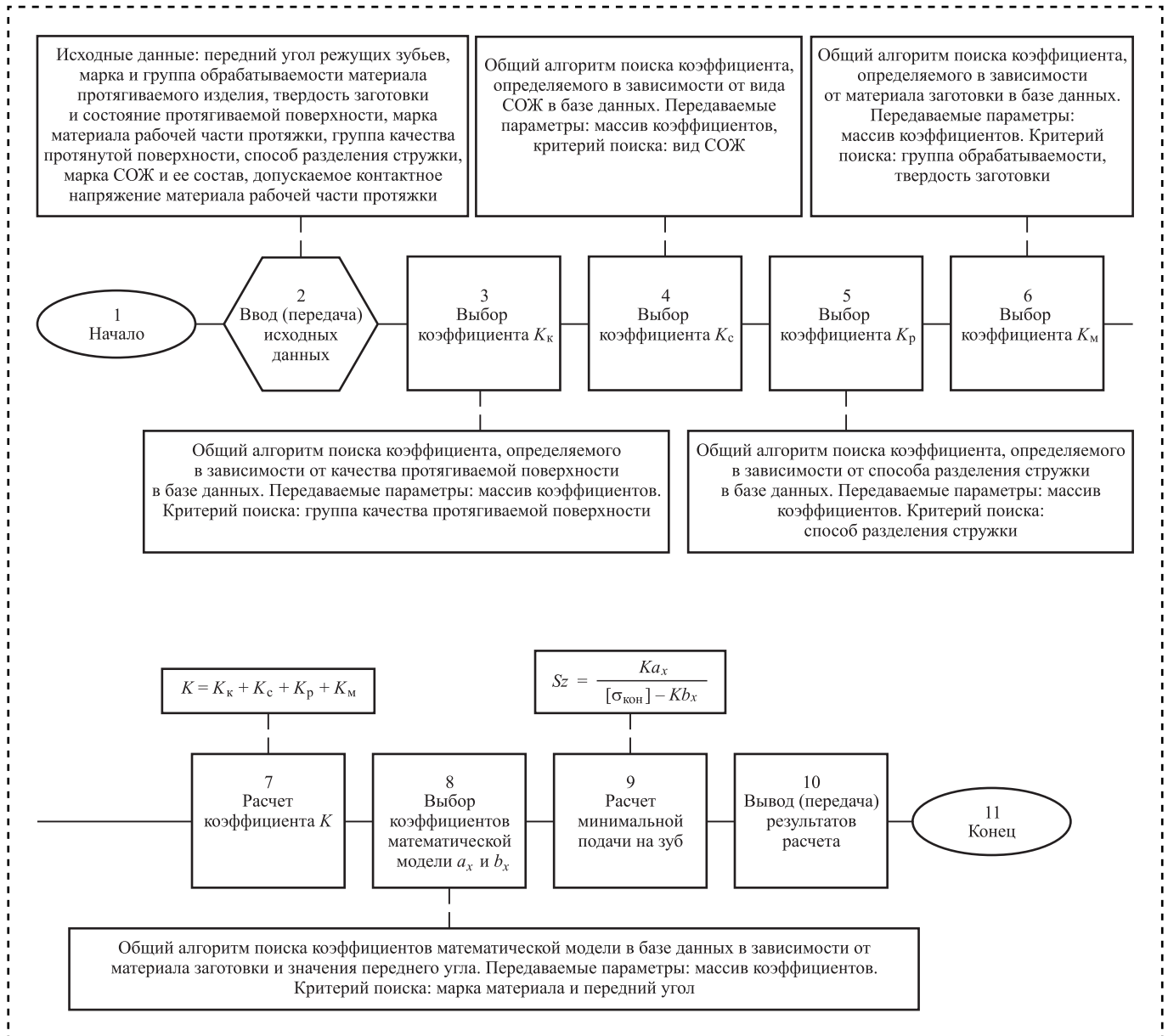


Рис. 1. Алгоритм методики расчета минимального подъема на зуб из условия допустимой контактной нагрузки на передней поверхности режущих зубьев

$$q_{уд} = a_x \frac{1}{Sz} + b_x,$$

где  $a_x$ ,  $b_x$  — коэффициенты математической модели;

$Sz$  — подача на зуб, мм.

В таблице в качестве примера приведены значения коэффициентов  $a_x$  и  $b_x$  математических моделей, рассчитанных для протягивания конструкционных углеродистых и легированных сталей в нормализованном, отожженном и горячекатаном состояниях, первой и второй групп качества, с разделением стружки

Коэффициенты  $a_x$  и  $b_x$

$\gamma, ^\circ$	5	10	15	20	25
$a_x$	56,011	28,215	17,733	11,314	7,693
$b_x$	2269,505	2065,016	1931,953	1840,968	1766,13

выкружками, при использовании в качестве СОЖ сульфозрезола и аналогичных ему по эффективности СОЖ.

На предпоследнем шаге алгоритма выполняем расчет минимального подъема на зуб для заданных условий протягивания по зависимости:

$$S_{z_{\min}} = Ka_x / ([\sigma_{\text{кон}}] - Kb_x),$$

где  $[\sigma_{\text{кон}}]$  — допускаемое контактное напряжение на передней поверхности, МПа;  $a_x$  и  $b_x$  — коэффициенты математической модели;  $K$  — поправочный коэффициент.

### Определение максимально возможного подъема на зуб

На рис. 2 представлен алгоритм определения максимально возможного подъема на зуб.

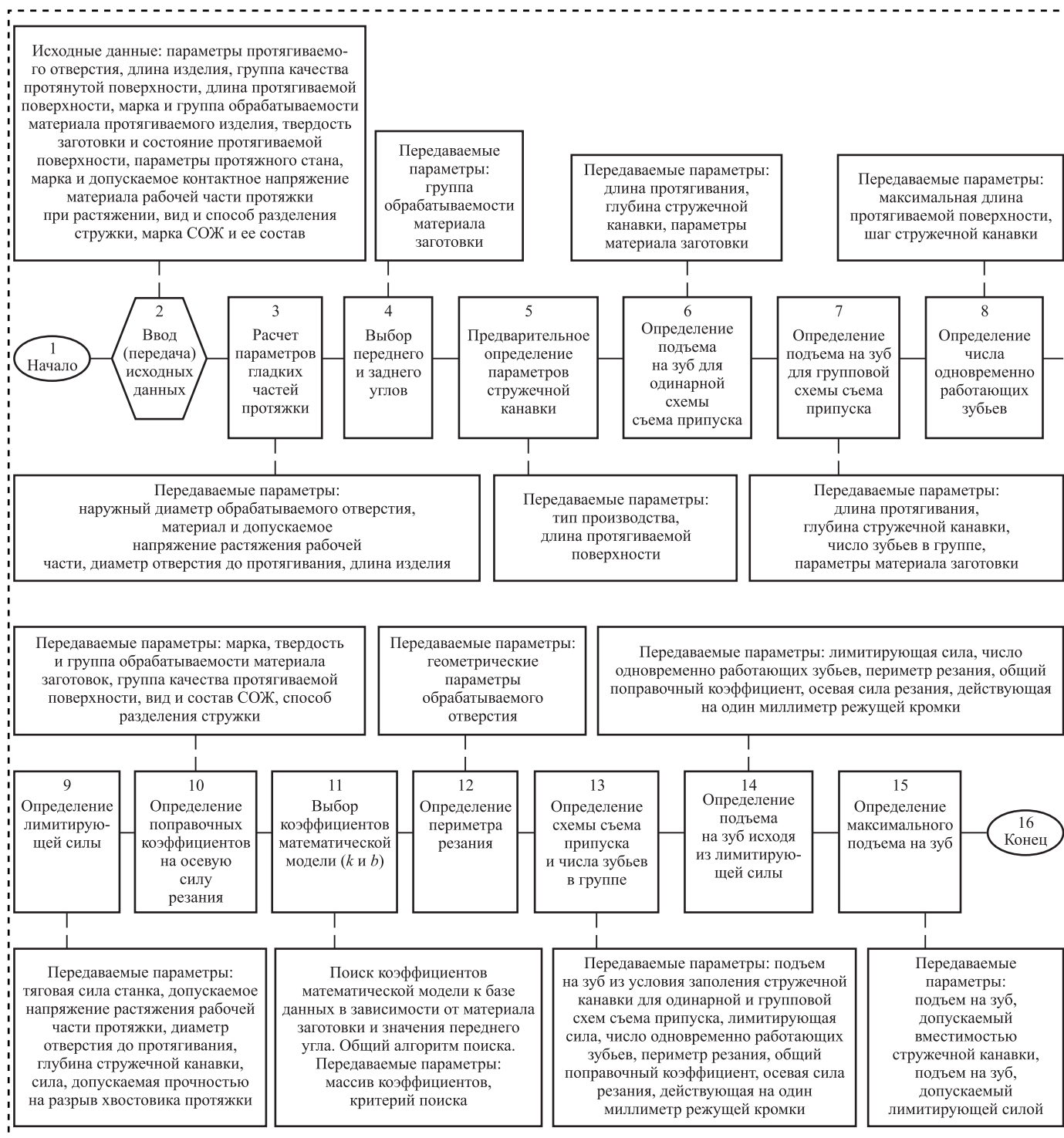


Рис. 2. Алгоритм методики расчета максимального подъема на зуб из условия обеспечения лимитирующей нагрузки



Исходные данные для расчета: параметры протягиваемого отверстия, длина изделия, группа качества протянутой поверхности, длина протягиваемой поверхности, марка и группа обрабатываемости материала протягиваемого изделия, твердость заготовки и состояние протягиваемой поверхности, параметры протяжного станка, технологические ограничения, марка материала рабочей части протяжки, допустимое контактное напряжение материала рабочей части протяжки  $[\sigma_{\text{кон}}]$ , допустимое напряжение материала рабочей части протяжки при растяжении  $[\sigma_p]$ , вид и способ разделения стружки, марка СОЖ и ее состав.

Максимально возможный подъем на зуб определяем по формуле:

$$Sz_{\max} = \frac{z_c F_{\text{lim}}}{K_p P_n z_p k} - \frac{b}{k},$$

где  $P_n$  — периметр последнего зуба;

$z_c$  — число зубьев в группе;

$K_p$  — поправочный коэффициент;

$z_p$  — число одновременно участвующих в работе зубьев;

$F_{\text{lim}}$  — лимитирующая сила протягивания;

$b$  — ширина резания;

$k$  — коэффициент математической модели.

### Библиографический список

1. **Протяжки** для обработки отверстий / Д.К. Маргулис и др. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.

2. **Емельянов С.Г., Кочергин В.С., Евсеев Е.Ю.** Автоматизированный подход к проектированию протяжек для обработки гранных отверстий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 5. С. 201–211.

3. **Емельянов С.Г., Селезнев Ю.Н., Рухлин А.С., Широконос Ю.Г.** Методика определения минимальной величины подъема на зуб при протягивании из условия обеспечения допустимых удельных контактных нагрузок на передней поверхности режущих зубьев // Современные инструментальные системы. Курск, КГТУ, 2004. С. 104 — 108.

4. **Селезнев Ю.Н., Губанов В.С., Сергеев С.А.** Автоматизированный расчет минимального подъема на зуб при протягивании // Современные инструментальные системы. Курск, КГТУ, 2005. С. 118–123.

5. **Селезнев Ю.Н., Кочергин В.С., Евсеев Е.Ю.** Анализ и выбор технологических критериев оценки конструкций протяжного инструмента // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. статей 2-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Курск. 2017. С. 237–240.

6. **Селезнев Ю.Н., Кочергин В.С., Евсеев Е.Ю.** Исследование зависимости максимальной величины подъема на зуб при протягивании от переднего угла, найденной из условия неперевышения лимитирующей силы // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 6-й Международной научно-технической конференции. Курск. 2018. С. 203–206.

7. **Евсеев Е.Ю., Кочергин В.С.** Анализ методов определения сил резания при внутреннем протягивании // Качество продукции: Контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 3-й Международной молодежной научно-практической конференции. 2016. Т. 1. С. 252–254.

8. **Кочергин В.С.** Теоретический анализ задач, связанных с проектированием эффективного протяжного инструмента с большими подачами для обработки гранных отверстий // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 4-й Международной молодежной научно-практической конференции. Курск. 2017. С. 312–314.

9. **Кочергин В.С.** Анализ воздействия смазывающе-охлаждающих технологических сред на качество процесса протягивания // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 2 (17). С. 72–76.







**Е.Н. Родионова**

(Тульский государственный университет, "НПО "СПЛАВ" им. А.Н. Ганичева", г. Тула),

**А.С. Ямников**, д-р техн. наук

(Тульский государственный университет),

**И.А. Матвеев**, канд. техн. наук

(НПО "СПЛАВ" им. А.Н. Ганичева", г. Тула)

E-mail: [masik-ele@yandex.ru](mailto:masik-ele@yandex.ru), [yamnikovas@mail.ru](mailto:yamnikovas@mail.ru), [ivan\\_matveev@list.ru](mailto:ivan_matveev@list.ru)

## Размерные цепи обеспечения входимости сборного осесимметричного корпуса в направляющее отверстие

Проведен расчет размерных цепей на примере вхождения корпуса реактивного двигателя в пусковую трубу. Выяснено, что используемая методика не учитывает реальных значений диаметров утолщений и поэтому требует значительного ужесточения допуска на радиальное биение собранного корпуса ракетного двигателя. Рассмотрен способ контроля радиального биения в призмах.

Dimension chains were calculated using the example of a jet engine housing entering the launch tube. It was found that the method used does not take into account the actual values of losses and requires significant reliability in the radial runout of the collected rocket engine case. A method for controlling radial runout in prisms is also considered.

**Ключевые слова:** размерные цепи, пусковая труба, радиальное биение.

**Keywords:** dimensional chains, launch tube, radial runout.

При расчете входимости обычно опираются на статистические данные точности изготовления пусковой трубы (ПТ) и отдельных деталей корпуса малогабаритного летательного аппарата (МЛА), так как они тонкостенные и не могут быть изготовлены без существенных отклонений геометрической формы.

По предварительно рассчитанному диаметру МЛА и его длине выбираем диаметр и длину ПТ (как правило, это одна деталь). С учетом технологии изготовления (сварная, тянутая и т.д.) назначаем параметры ПТ: диаметр с допуском  $D_{pt\ max}$ ,  $D_{pt\ min}$  и максимально допустимую кривизну оси  $K_{pt}$ . Опираясь на допустимые величины зазоров, обеспечивающие точность начального перемещения, назначаем диаметр центрирующего утолщения (ЦУ)  $D_1 = D_2$ . Эти диаметры находятся на противоположных концах корпуса ракетного двигателя (КРД). При этом учитываем и возможные погрешности формы, которые увеличивают зазоры в

случае выхода их за пределы допуска диаметров, что имеет место у тонкостенных деталей и регламентируется величиной выхода погрешности формы (чаще всего это овальность) за границы поля допуска размеров диаметров ЦУ. Находим диаметр среднего утолщения  $D_3$ , решая размерную цепь с учетом погрешностей формы утолщений и их передаточных отношений (рис. 1):

$$Z = D_{pt\ min} - K_{pt} - 0,25D_1 - 0,25D_2 - 0,5D_3 + 0,25\xi_1\Delta_{ov1} + 0,25\xi_2\Delta_{ov2} + 0,5\xi_3\Delta_{ov3} + \xi_4K_{и}, \quad (1)$$

где  $D_1, D_2$  — диаметры ЦУ;

$D_3$  — диаметр среднего утолщения;

$\Delta_{ov}$  овальность поверхностей по рассматриваемым диаметрам;

$K_{и}$  — кривизна оси КРД в месте среднего сечения (смещение центра среднего сечения относительно оси КРД, проходящей через крайние сечения диаметров ЦУ);

$\xi_1, \xi_2, \xi_3$  — передаточные отношения, учитывающие степень влияния овалностей в зависимости от угла между направлением измеряемого размера вхождения  $B_Z$  и положением большой полуоси овала (эллипса) утолщения;

$\xi_4$  — передаточное отношение, учитывающее совпадение направления смещения оси КРД в среднем сечении с направлением измерения  $B_Z$ .

Параметры  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  меняются в пределах от 0 до 1, что приводит к увеличению зазора  $Z$ , обеспечивающего нормальное вхождение КРД в ПТ. Если погрешности отсчитываются внутрь описанного контура, принимаемого за диаметры ЦУ, то  $\xi_4$  может изменяться от  $-1$  до 1, что соответствует смещению центра среднего сечения в одну и в другую стороны до предела (изгиб в одном и в другом направлениях). Поскольку при этом изменяется положение точек контакта с ПТ, что не учитывается размерной цепью,  $\xi_4$  принято рассматривать в пределах от  $-1$  до 0, т.е. кривизна оси изделия всегда уменьшает зазор.

При решении этой размерной цепи имеем два неизвестных:  $D_3$  — диаметр среднего утолщения и  $K_{и\text{доп}}$  — кривизна оси изделия в этом сечении. Овальность в среднем сечении  $\Delta_{ov3}$  обычно назначаем заранее из условий технологичности изготовления этой поверхности. При этом с уменьшением диаметра среднего утолщения  $D_3$  допускаемая кривизна изделия может увеличиваться. Однако уменьшение диаметра среднего утолщения приводит к уменьшению рабочего объема ракетного двигателя или к снижению прочности (жесткости) применяемого соединения, так как уменьшается толщина стенки трубы. Поэтому определим предельные значения  $K_{и}$  в среднем сечении, пользуясь не зависимостью (1), а более простой при  $\xi_4 = 1$  и  $\Delta_{ov1} = \Delta_{ov2} = \Delta_{ov3} = 0$ , с учетом, что допустимое значение  $Z = 0$ :

$$K_{и} = D_{pt\text{ min}} - 0,25D_1 - 0,25D_2 - 0,5D_3. \quad (2)$$

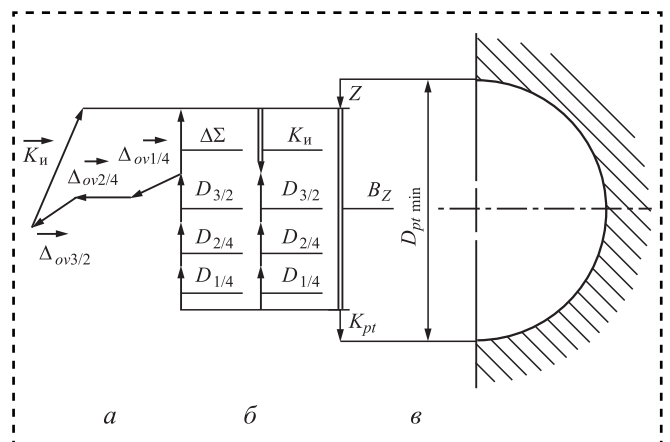
Полученное значение  $K_{и}$  анализируем с точки зрения возможности его обеспечения в сборном изделии, назначаем при этом допуски на размеры сопрягаемых резьбовых соединений, что выражается в решении еще одной сложной задачи по оценке возможного положения деталей в сборе.

При расчете максимально допустимой кривизны оси КРД полагаем:  $D_1 = D_2 = 122$  мм;

$D_3 = 121,6$  мм;  $\Delta_{ov1} = \Delta_{ov2} = \Delta_{ov3} = 0$ ; диаметр цилиндра нулевой кривизны  $A_0 = 121,9$  мм. Решая уравнение (2), находим  $K_{и} = 0,1$  мм. В этом случае допустимое радиальное биение равно  $E_p = 0,2$  мм.

Принятая методика не учитывает реальных значений диаметров утолщений и поэтому требует значительного ужесточения допуска на радиальное биение собранного КРД, однако гарантирует 100%-ную входимость.

Вероятностный расчет упрощенной размерной цепи позволяет расширить предельно допустимое значение кривизны до  $K_{и} = 0,25$ ; и соответственно допуск на радиальное биение до  $E_p = 0,5$  мм. Рассчитанное таким образом значение радиального биения проставляется в чертежах, и считается, что входимость обеспечивается. Однако не более 12 % сборок имеют  $E_p \leq 0,2$  мм (т.е. на 100 % войдут в ПТ), 10...15 % сборок имеют  $E_p > 0,5$  мм и бракуются (подвергаются перебору), так как вероятность того, что они не войдут, большая. Из оставшихся и признанных годными по биению имеется определенный, заложенный при вероятном расчете, процент деталей, которые не войдут в ПТ, и выявить их по величине радиального биения невозможно. Поэтому необходимо проверять 10...15 % деталей на входимость по эталонной ПТ, что повышает трудоемкость изготовления МЛА, но в свою очередь не гарантирует вхождения, так как выборочный контроль при низком проценте брака не может его выявить полностью.



**Рис. 1. Размерные цепи, используемые при расчете входимости корпуса реактивного двигателя в пусковую трубу:**

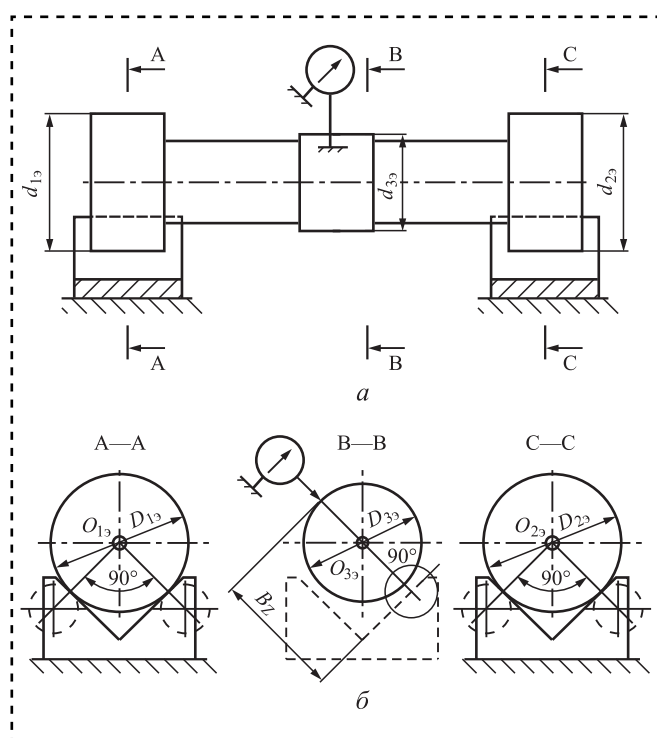
*a* — размерная цепь КРД; *б* — упрощенная размерная цепь КРД для определения ее кривизны; *в* — размерная цепь КРД для определения размера  $B_Z$

Это приводит во время эксплуатации к невыходу МЛА из ПТ, что недопустимо. Однако эти случаи очень редки вследствие того, что ПТ не всегда имеет минимальный диаметр и максимальную кривизну оси.

В принятом способе контроля есть существенный недостаток — способ не позволяет гарантировать входимость. Этот недостаток легко устранить при непосредственном контроле разности диаметра прилегающего цилиндра нулевой кривизны трубы и размера вхождения КРД (см. рис. 1, в) [1].

Если средних утолщений не одно, а несколько, то каждое из них рассчитывают независимо одно от другого, при этом все они контролируются, если назначены допуски на размеры так, чтобы было одно критическое сечение, обеспечивающее гарантированное вхождение изделия в ПТ. Тогда способ контроля может быть реализован с помощью установки, применяемой для контроля радиального биения в действующем производстве [2, 3].

При контроле радиального биения КРД устанавливается в двух призмах по ЦУ, а по среднему утолщению определяют радиальное биение (рис. 2).



**Рис. 2. Схема способа контроля размера вхождения:**  
 а — положение изделия при контроле; б — настройка по эталону

В действующем производстве используют, как правило, роликовые призмы, так как они облегчают процесс контроля и не повреждают поверхности контролируемого изделия, из-за отсутствия при этом скольжения поверхностей изделия относительно призм.

Диаметр роликов подбирают таким образом, чтобы они имитировали девяностоградусную призму и проседание осей базовых поверхностей было минимальным. Если датчик линейных перемещений установить под углом в  $45^\circ$  к биссектрисе угла призмы (перпендикулярно к одной из граней призмы (см. рис. 2, б)), то будет измеряться непосредственно размер  $B_z$ . Для настройки прибора используют лекальные линейки и набор концевых мер или эталон, представляющий собой предельно допустимое изделие, которое еще может войти в ПТ при  $Z_{\min} = 0$ . При этом диаметр среднего утолщения эталона рассчитывают по зависимости:

$$D_{33} = 2 \left( A_0 - \frac{D_{13} + D_{23}}{4} - \Delta_{\Sigma 3} \right), \quad (3)$$

где  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  — фактические диаметры крайних утолщений эталона, изготовленные по номинальным диаметрам изделия,  $D_{13} = D_1 = D_{23} = D_2$ ;

$\Delta_{\Sigma 3}$  — суммарная погрешность изготовления эталона,  $\Delta_{\Sigma 3} \rightarrow 0$ .

Этот эталон устанавливают в контрольное приспособление и к среднему утолщению подводят датчик линейных перемещений таким образом, чтобы линия его действия была нормальна к одной из граней призмы. Точка контакта датчика с эталоном определяет предельный размер вхождения  $B_{z \text{ доп}}$ , при превышении которого изделие признается негодным. Контакт берется протяженным, чтобы исключить влияние смещения от овальности.

В этом случае при повороте изделия в призмах следят только за одним показанием датчика: чтобы контролируемый размер не выходил за пределы допустимого, что более производительнее. Эта операция легко поддается автоматизации, что повышает надежность контроля, так как исключает субъективный фактор (контролера).

В условиях действующего производства базовые элементы имеют допуск на изготовление, поэтому необходимо оценить погреш-



ность контроля размера  $B_Z$  для различных типов базирующих элементов. Настройка прибора также возможна, если размер эталона  $D_{3\alpha}$  несколько отличается от значения, рассчитанного по зависимости (3). Это несоответствие легко устранить при помощи концевых мер длины или микрометрических винтов на датчике (однако это вносит свои погрешности в измерение, что тоже необходимо учитывать для гарантированного обеспечения входимости).

### Заключение

Приведен расчет размерных цепей для назначения допусков на размеры сопрягаемых резьбовых соединений, который оценивает возможное положение деталей в сборе.

Предложенный способ контроля размера вхождения корпуса реактивного двигателя в пусковую трубу повышает производительность работ.

### Библиографический список

1. Пат. RU 2 682 572 C1, МПК G01 B5/08. Способ контроля диаметра прилегающего цилиндра сборного ступенчатого корпуса / Ямников А.С., Ямникова О.А., Матвеев И.А., Родионова Е.Н.; заявл. 21.11.17; опубл. 19.03.2019. Бюл. № 8. 8 с.
2. Ямников А.С., Ямникова О.А., Матвеев И.А., Родионова Е.Н. Влияние погрешностей формы и положения базовых поверхностей сборного осесимметричного корпуса на размер прилегающего контура // Измерительная техника, 2019. № 8. С. 29–32.
3. Васильев А.С., Грязев В.М., Ямников А.С. Функционально связанные сборочные размерные цепи, обеспечивающие нормированный контакт поверхностей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 36–40.



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 15.06.2020. Подписано в печать 04.08.2020. 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.

## К сведению авторов журнала «Сборка в машиностроении, приборостроении»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через полтора интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию представляется статья в электронном виде — файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

### Требования к оформлению статьи

#### 1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

*Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.*

#### 2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

#### 3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации <http://teacode.com/online/udc/>);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

*Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой (\*) на первой странице.*

#### 4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

#### 5. После текста должен быть приведен список литературы, используемый при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5—2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускается ссылка на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

#### 6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисовочную подпись. Подрисовочные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

*Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!*

#### Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении редакционного совета без предоставления рецензии.

**Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются**

**Плата за публикацию статей не взимается**

