

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

7 2013
(156)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

- Чижиков В.И.** Управление упругим кинематическим соединением бесшарнирного манипулятора 3
- Давыдова Е.В., Преис В.В.** Теоретические основы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором 8
- Иванов А.А.** Бесконтактный захват промышленного робота 15

Технологическая оснастка для сборки

- Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Многошпиндельное переналаживаемое завинчивающее устройство 19

Сборка с использованием клеев

- Безменов В.С., Игнатов А.В.** Методика проектирования автоматизированных устройств нанесения и дозирования клеевых составов для сборочных производств с клеевыми соединениями 23

В помощь конструктору, технологу

- Шаломов В.И.** Особенности методики проектировочного расчета шпиндельных узлов шлифовальных станков с газостатическими частично пористыми опорами 32

Сборочно-сварочные работы. Пайка

- Карабанов В.В., Бохоров И.О.** Пайка алюминия и его сплавов 35

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА	А.И. КУМЕНКО
А.С. ВАСИЛЬЕВ	А.В. МЕДАРЬ
(главный редактор)	Е.А. МИКРИН
А.А. ГУСЕВ	В.В. ПОРОШИН
М.В. ВАРТАНОВ	Б.В. ШАНДРОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ	А.А. ШАТИЛОВ
И.Н. ЗИНИНА	А.Г. ХОЛОДКОВА
Ю.Л. ИВАНОВ	Г.А. ЯРКОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ	

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД	ОРЕНБУРГ
Н.А. ПЕЛИПЕНКО	А.Н. ПОЛЯКОВ
БРЯНСК	А.И. СЕРДЮК
О.А. ГОРЛЕНКО	А.П. ФОТ
ВЛАДИВОСТОК	РЫБИНСК
Ю.Н. КУЛЬЧИН	В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
А.А. СУПОНЯ	В.В. НЕПОМИЛУЕВ
В.М. КОРНИЕНКО	А.Н. СЕМЕНОВ
ВОЛГОГРАД	САМАРА
В.Г. КАРАБАНЬ	М.А. ЕВДОКИМОВ
М.Г. КРИСТАЛЬ	Ю.А. ВАШУКОВ
В.И. ЛЫСАК	Г.А. КУЛАКОВ
В.М. ТРУХАНОВ	В.А. НИКОЛАЕВ
ИЖЕВСК	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
И.В. АБРАМОВ	В.Ф. КУЗЬМИН
Б.А. ЯКИМОВИЧ	Е.В. ШАЛОБАЕВ
В.Г. ОСЕТРОВ	ТОЛЬЯТТИ
КАЗАНЬ	А.И. РЫЖКОВ
Р.И. АДГАМОВ	ТУЛА
КОВРОВ	В.В. ПРЕЙС
Ю.З. ЖИТНИКОВ	ХАБАРОВСК
КОЛОМНА	В.А. ЛАШКО
Ю.Д. АМИРОВ	
КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ	Украина
Б.Н. МАРЬИН	КИЕВ
В.И. ШПОРТ	А.С. ЗЕНКИН
А.М. ШПИЛЕВ	В.А. МАТВИЕНКО
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ	ДОНЕЦК
С.В. ДМИТРИЕВ	А.Н. МИХАЙЛОВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ	СЕВАСТОПОЛЬ
НИЖНИЙ НОВГОРОД	Е.Л. ПЕРВУХИНА
С.В. ГОЛУБЕВ	
ОМСК	Беларусь
В.Н. КОСТЮКОВ	МИНСК
ОРЕЛ	В.Л. БАСИНЮК
Ю.С. СТЕПАНОВ	М.Л. ХЕЙФЕЦ
Г.А. ХАРЛАМОВ	ГОМЕЛЬ
	В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
	ИЗРАИЛЬ
	В.М. БЕДРИН
	ПОЛЬША
	П. ЛЕБКОВСКИ
	Е. ЛУНАРСКИ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" – 79748, Объединенному каталогу "Пресса России" – 84967, каталогу "Почта России" – 60257) или непосредственно в издательстве
Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: sborka@mashin.ru
Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

THE MONTHLY
NEWSMAGAZINE
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS
THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

7 2013
(156)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

- Chijikov V.I.** Management of bessharnirnogo's elastic kinematic connection of the manipulator 3
- Davidova E.V., Preys V.V.** Theoretical base of the designing disk toothed hopper feeding device with recirculating orientator 8
- Ivanov A.A.** The contactless grip of the industrial robot 15

Technological equipment for assembly

- Zhitnikov B.Yu., Zhitnikov Yu.Z.** The multi-spindle readjusted screwing device 19

Assembly with use glue

- Bezmenov V.S., Ignatov A.V.** Automated mixed glue spreading and metering machine design technique for assembling based on glue joint 23

Industrial and design engineer's aid

- Shalomov V.I.** Features of the design methodology of calculation of spindle assemblies grinding machines with gas-static partially porous supports 32

Assembly welding works. Soldering

- Karabanov V.V., Bohorov I.O.** Soldering of aluminum and its alloys 35

Chair of Editorial Advisory Board –
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)	A.I. KUMENKO
M.V. VARTANOV	A.V. MEDAR'
A.M. DALSKY	E.A. MIKRIN
A.A. GUSEV	V.V. POROSHIN
I.N. ZININA	B.V. SHANDROV
Yu.L. IVANOV	A.A. SHATILOV
Yu.G. KOZYREV	A.G. KHOLODKOVA
	G.A. YARKOV

Regional editors

BELGOROD

N.A. PELIPENKO

BRIANSK

O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
V.M. KORNIENKO

VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

IZNEVSK

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

KAZAN

R.I. ADGAMOV

KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA

Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELYN

S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

OMSK

V.N. KOSTIUKOV

OREL

Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG

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

RYBINSK

V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV

SAMARA

M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
G.A. KULAKOV
V.A. NIKOLAEV

ST.-PETERSBURG

V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBABEV

TULA

V.V. PREYS

TOLIATI

A.I. RYZHKOV

KHABAROVSK

V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV

A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

SEVASTOPOL

E.L. PERVUKHINA

Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL

V.E. STARZHINSKI

ISRAEL

V.M. BEDRIN

POLAND

P.LEBKOVSKI

E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:

Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000 Free price

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency – 79748, the union catalogue "Pressa Rossii" – 84967, the catalogue "Pochta Rossii" – 60257) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building" 107076, Moscow, Stromynsky per. 4
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.

УДК 517.977

В.И. Чижиков, канд. техн.наук, доцент (Московский государственный университет приборостроения и информатики)
E-mail: vichizhikov@gmail.com

Управление упругим кинематическим соединением бесшарнирного манипулятора

Исследована возможность управления упругим кинематическим соединением на основе пружины Бурдона. Раскрытие пружины моделируется радиус-вектором, соединяющим неподвижную и подвижную точки пружины. Получены управляющие функции для оптимального по быстродействию управления при ограничении на энергетические ресурсы.

Management possibility by elastic kinematic connection on the basis of a spring of Burdona is investigated. Spring disclosing is modelled by a radius-vector connecting motionless and mobile points of a spring. Operating functions for optimum management on speed are received at restriction on power resources.

Ключевые слова: управляющая функция, оптимальное управление, прецизионный робот.

Keywords: operating function, optimum control, precision robot.

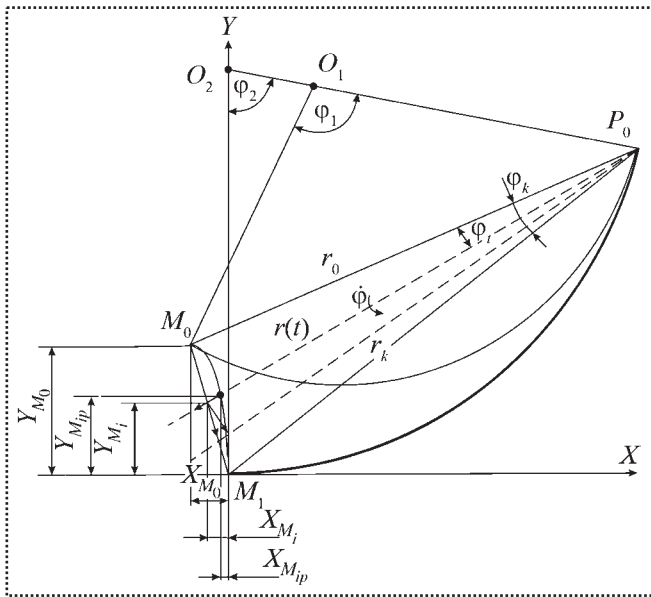
В микроэлектронной промышленности некоторые производства требуют особых условий при выполнении технологических операций. Так, на операциях юстировки и контроля интегральных схем заняты операторы, работающие в особо чистой среде, которая поддерживается в очень жестких границах по температуре и другим показателям. Стабильность показателей коррелируется с выходом бракованных изделий, причем установлена некоторая зависимость между психоэмоциональным состоянием оператора, качеством и временем проведения технологических операций.

Особое внимание привлекает возможность создания прецизионных роботов и манипуляторов с различной конфигурацией, предназначенных для выполнения ряда функций в вакууме при сравнительно небольших усилиях. Манипуляторы и робо-

ты на основе упругодеформируемых элементов кроме операций загрузки и выгрузки могут осуществлять операции контроля, используя небольшие перемещения, погрешность которых может быть ограничена только упругим гистерезисом. Основу манипуляционной системы составляют звенья на базе трубок Бурдона [1, 2], форма которых зависит от подаваемого в них давления. Созданное давление во внутренней полости трубки стремится придать поперечному сечению форму окружности. Изначально эта форма может быть овальной, ромбической или иной, отличной от окружности, причем в плоскости кривизны оси пружины обычно растягивается малая ось сечения. Вследствие деформации сечения внутренний радиус трубки уменьшается и внутренние волокна трубки сжимаются. Аналогично, внешний радиус увеличивается, а внешние волокна растягиваются. В результате деформации волокон возникает момент внутренних сил, вызывающий распрямление трубки, т.е. увеличение среднего радиуса и уменьшение центрального угла трубки.

Таким образом, применение подобных механизмов позволяет почти полностью исключить внешнее трение, являющееся одной из главных причин работоспособности механизмов. Упругодеформируемые приводные элементы служат для формирования движения и транспортирования энергоносителя в элементы системы, последовательно соединенные с ней.

При формировании сложных перемещений необходимо последовательно соединить некоторое число упругих элементов с одинаковыми или разными радиусами кривизны, определенным образом ориентированных относительно друг друга в плоскости или пространстве.



Расчетная схема координат траектории конца упругого элемента при обратном движении

Рассмотрим представленный на рисунке полый упругий элемент с постоянной кривизной главной оси в начальном (до деформации – точка M_0) и конечном (после деформации – точка M_1) положениях. Задачу получения уравнений движения точки M решают в полярной системе координат, при этом кинематические характеристики, полученные в ней, удобно разложить по ортам декартовой системы, начало которой размещено в точке M_1 .

Соединим точки M_0 и M_1 с точкой P_0 , причем последняя неподвижна в действительном перемещении упругого элемента. Получаем два крайних положения радиус-вектора $\overline{M_i P_0}$, перемещающегося из начального положения M_0 в конечное M_1 по участку прямолинейной траектории $\overline{M_0 M_1}$, длина которого равна l_0 . Следует отметить, что в общем случае $l_0 \neq S$ – длины дуги гипоциклоиды, которую описывает точка M_i при перемещении под действием избыточного давления в полости пружины. Известными являются:

- $\overline{M_0 M_1} = l_0$ – длина отрезка прямой траектории;
- начальный вылет $\overline{P_0 M_0} = r_0$ и конечный вылет $\overline{P_0 M_1} = r_k$ хорды главной центральной

оси упругого элемента в начальном и конечном положениях;

- φ_k – угол между крайними положениями вектора, совмещенного с хордами.

Из расчетной схемы имеем координаты для точки, размещенной на свободном конце пружины в системе координат с началом в точке M_1 с текущим значением избыточного давления в полости

$$X_M(t) = r_{2k} \left\{ 1 - \frac{\varphi_{1H} - 2\varphi_k(t_k)}{\varphi_{1H} \left[1 - \frac{(\varphi_{1H} - \varphi_{2k})\varphi(t)}{\varphi_{1H}\varphi_{1k}} \right]} \right\} \times \sin \left\{ \varphi_{1H} \left[1 - \frac{(\varphi_{1H} - \varphi_{2k})[\varphi_k - \varphi(t)]}{\varphi_{1H}\varphi_k} \right] \right\} - \frac{r_{2k} [\varphi_{1H} - 2\varphi_k(t_k)]}{\varphi_{1H} \left[1 - \frac{(\varphi_{1H} - \varphi_{2k})\varphi(t)}{\varphi_{1H}\varphi_k} \right]} \sin \left[\varphi_{1H} - \varphi_{2k} \frac{\varphi_k - \varphi(t)}{\varphi_k} \right];$$

$$Y_M(t) = r_{2k} \left\langle 1 - \left[1 - \frac{\varphi_{1H} - 2\varphi_k(t_k)}{\varphi_{1H} \left(1 - \frac{(\varphi_{1H} - \varphi_{2k})\varphi(t)}{\varphi_{1H}\varphi_{1k}} \right)} \right] \right\rangle \times \cos \left\{ \varphi_{1H} \left[1 - \frac{(\varphi_{1H} - 2\varphi_k)[\varphi_H - \varphi(t)]}{\varphi_{1H}\varphi_{1H}} \right] \right\} - \frac{r_{2k} [\varphi_{1H} - 2\varphi_k(t_k)]}{\varphi_{1H} \left(1 - \frac{(\varphi_{1H} - \varphi_{2k})\varphi(t)}{\varphi_{1H}\varphi_k} \right)} \cos \left((\varphi_{1H} - \varphi_{2k}) \frac{\varphi_k - \varphi(t)}{\varphi_k} \right),$$

где [3, 4]

$$\varphi_k(t) = \arcsin \left[l_k \left(3 - 2 \frac{t}{t_1} \right) \frac{t^2}{t_1^2} \sin \beta \frac{1}{\sqrt{l^2(t) + r_0^2 - 2l(t)r_0 \cos \beta}} \right],$$

$$r_k(t) = \sqrt{l^2(t) + r_0^2 - 2l(t)r_0 \cos \beta}$$

$$\text{при } l(t) = l_k \left(3 - 2 \frac{t}{t_1} \right) \frac{t^2}{t_1^2}.$$



Здесь $\angle\beta = \angle P_0 M_0 M_1$, который в общем случае является переменным;

l_k – максимальное перемещение конечной точки при раскрытии пружины;

$r_{2к}$ – радиус главной центральной оси пружины в раскрытом состоянии;

t, t_k – текущее и конечное время перемещения подвижной точки пружины;

φ_n, φ_k – начальное и конечное значения центральных углов пружины;

$\varphi(t)$ – текущее значение угла поворота радиус-вектора r_0 .

При исходных значениях центральных углов, близких к $3/2\pi$ и более, траектория конца пружины приближается к прямой линии и погрешность между точной и аппроксимированной траекториями мала. При углах, меньших упомянутого, погрешность возрастает и точную траекторию целесообразно сравнивать с траекторией, полученной из условия минимального времени перемещения из исходной точки в конечную при ограничении на энергетические ресурсы.

Пусть имеем следующее.

1. Точка M_0 является материальной точкой с единичной массой, перемещение которой описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{r} - r\dot{\varphi}^2 = u_1 \\ r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} = u_2, \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол поворота радиус-вектора;

r – радиус-вектор материальной точки M_0 .

2. Критерий оптимальности (быстродействие)

$$I = \int_{t_0}^{t_1} dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

3. Ограничение на энергетические ресурсы:

$$\int_{t_0}^{t_1} u_1 dt = E_1; \quad \int_{t_0}^{t_1} u_2^2 dt = E_2, \quad (3)$$

где E_1 и E_2 – константы, зависящие от типа привода.

4. Краевые условия, определяющие начальную и конечную точки траектории и проекции этих скоростей в этих точках:

$$\begin{aligned} r(t_0) = r_0 = 0; \quad \dot{r}(t_0) = \dot{r}_0 = 0; \\ \varphi(t_0) = \varphi_0 = 0; \quad \dot{\varphi}(t_0) = \dot{\varphi}_0 = 0; \\ r(t_1) = r_1 = r_1^*; \quad \dot{r}(t_1) = \dot{r}_1 = 0; \\ \varphi(t_1) = \varphi_1 = \varphi_1^*; \quad \dot{\varphi}(t_1) = \dot{\varphi}_1 = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_1^*, r_1^* – конечные значения обобщенных координат.

Система уравнений движения материальной точки в плоскости после замены переменных $r = x_1; \dot{r} = \dot{x}_1; \varphi = x_3; \dot{\varphi} = \dot{x}_3 = x_4$ приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = u_1 + x_1 \dot{x}_3 = u_1 + x_1 x_4; \\ \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 = \frac{u_2 - 2x_2 x_4}{x_1}. \end{cases} \quad (5)$$

Решение изопериметрической задачи относительно управления для заданного критерия (2) и ограничений (3), краевых условий (4), уравнений состояния (5) сводится к поиску экстремума функционала

$$I = \int_{t_0}^{t_1} L dt, \quad (6)$$

где L – функция Лагранжа.

В данном случае имеем:

$$\begin{aligned} L = \psi_0 \cdot 1 + \psi_1 (x_2 - \dot{x}_1) + \psi_2 (u_1 + x_1 x_4 - \dot{x}_2) + \\ + \psi_3 (x_4 - \dot{x}_3) + \psi_4 \left(\frac{u_2 - 2x_2 x_4}{x_1} - \dot{x}_4 \right) - u_1^2 - u_2^2, \end{aligned}$$

где ψ_i – неопределенные множители Лагранжа, $\{i=0, 4\}$.

Как известно, необходимые условия экстремума функционала (уравнения Эйлера–Лагранжа) имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{u}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_j} = 0, \quad \{j=1, 2\}. \end{aligned} \quad (7)$$



Управления u_1 и u_2 могут быть найдены в результате численного интегрирования.

Если в качестве x_1 и x_3 принять функции, полностью удовлетворяющие краевым условиям, то:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1(0) + \frac{x_1^*}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{t_1} t \right); \\ x_3 &= \frac{x_3^*}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{t_1} t \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $x_1^* = r(t_1)$, $x_3^* = \varphi(t_1)$. После подстановки формулы (8) в уравнение (7) и преобразования выражения для управлений принимают вид:

$$\begin{aligned} U'_1 &= \frac{\pi^2 x_1^*}{2t_1^2} \cos \frac{\pi t}{t_1} - \\ &- \left[x_1(0) + \frac{x_1^*}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{t_1} \right) \right] \frac{x_3^{2*}}{4t_1^2} \pi^2 \sin^2 \frac{\pi t}{t_1}; \\ U'_2 &= \frac{\pi^2 x_3^*}{2t_1^2} \left[\left(x_1(0) + \frac{x_1^*}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{t_1} \right) \right) \times \right. \\ &\left. \times \cos \frac{\pi t}{t_1} + x_1^* \sin \frac{\pi t}{t_1} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь при преобразовании были использованы уравнения фазовых переменных в системе (7).

На основании приближённого аналитического решения уравнения (7) представляется возможность найти начальные значения множителей Лагранжа (при $t = t_0 = 0$) с последующим уточнением решения системы уравнений путем реализации процедуры поиска на ЭВМ.

В данном случае принимают следующие начальные приближения:

$$\begin{aligned} \psi_1(0) &= 0, \quad \psi_2(0) = \frac{x_1^* \pi^2}{t_1^2}, \quad \psi_3(0) = 0, \\ \psi_4(0) &= x_1(0) x_3^* \frac{\pi^2}{t_1^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные уравнения являются исходными предпосылками для расчета упругих элементов на основе трубок Бурдона.

Алгоритм решения задачи перемещения конечной точки M , расположенной на главной оси трубчатого упругого элемента, предполагает, как уже

упоминалось, нахождение траектории с минимальным временем ее прохождения при ограничениях на привод (мощность, развиваемую упругим элементом при его перемещении).

При известных параметрах упругого элемента, т.е. известном центральном угле, радиусе кривизны, параметрах поперечного сечения, траектория конечной точки M пружины известна. В декартовой системе координат, связанной с конечной точкой в деформированном состоянии, эта траектория представлена гипоциклоидой [3] и, следовательно, в каждой ее точке можно определить вектор аналога скорости перемещения конечной точки пружины, приняв за обобщенную координату центральный угол недеформированной пружины.

Скорость конечной точки может быть определена в виде функциональной зависимости расхода массы воздуха, поступившего в полость пружины, от изменения ее объема под действием избыточного давления.

Рассмотрим уравнение состояния воздуха в полости трубки при увеличении в ней давления, когда площадь поперечного сечения трубки увеличивается и создается дополнительный объем ΔV .

Масса воздуха в трубке с неизменной длиной главной центральной оси

$$m = \rho (V_0 + \Delta V), \quad (11)$$

где ρ – плотность воздуха;

V_0 – начальный объем рабочей полости;

ΔV – увеличение объема полости за счет увеличения площади поперечного сечения вследствие прогибов стенок по его периметру:

$$\Delta V = R_s \Delta F; \quad V_0 = R_s F.$$

Здесь R_s – длина главной центральной оси;

ΔF – изменение площади поперечного сечения.

Известно, что плотность идеального газа равна $\rho = \frac{P}{R_y T}$. Здесь P – давление, R_y – универсальная

газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Используя выражения для ΔV и ρ , равенство (12) для массы принимает вид:

$$m = \frac{P_1}{RT} (V_0 + \Delta V), \quad (12)$$



где P_1 – избыточное давление.

Дифференцируя равенство (12) по времени и разрешая относительно $\frac{dP_1}{dt}$, получим

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\frac{RT}{R_s} G - P_1 \frac{d\Delta F}{dt}}{F_0 + \Delta F}, \quad (13)$$

где G – расход воздуха в рабочую полость трубки, определяемый согласно режимам истечения.

Последнее уравнение определяет процесс изменения давления при перемещении конца трубки при прямом ходе. Его решение возможно, если известны зависимости для переменной $\frac{d(\Delta F)}{dt}$.

Воспользуемся уравнением, определяющим относительный угол поворота конца пружины, полученной в работе [2]:

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = P_1 \frac{1-\nu^2}{E} \frac{R^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + \chi^2}, \quad (14)$$

где ν – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости первого рода;

χ – главный параметр пружины;

R, a, b, h – параметры пружины.

Запишем правую часть равенства (14) в виде

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = P_1 A, \quad (15)$$

где A – коэффициент с размерностью МПа^{-1} .

Дифференцируя последнее равенство и разрешая его относительно $\frac{dP}{dt}$, имеем:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d\left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi}\right)}{A dt}. \quad (16)$$

Относительный угол легко выразить через перемещение конца трубки λ [6]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\Gamma d\lambda}{A dt} = \dot{\lambda} \frac{\Gamma}{A}, \quad (17)$$

где Γ – геометро-кинематические характеристики упругого элемента.

Делая преобразование и решая дифференциальное уравнение относительно приращения площади поперечного сечения, получим

$$\Delta F = \left(\frac{RTGA}{R_s \Gamma \lambda} - F_0 \right) \left(1 - e^{-\frac{\dot{\lambda} t \Gamma}{P_1 A}} \right). \quad (18)$$

Объем предварительного наполнения V_0 заполняется воздухом до начала изменения площади поперечного сечения F_0 . Расход воздуха через дроссельное отверстие для докритического истечения определяется по формуле

$$G = \mu f P_1 \sqrt{\frac{2(P_2/P_1)(1-P_2/P_1)}{RT}},$$

где μ – коэффициент расхода газа через сечение;

P_1 – давление в магистрали;

P_2 – атмосферное давление;

f – площадь дроссельного отверстия.

Сравнение массового расхода во времени с расходом при истечении через дроссельное отверстие дает выражение для определения площади дроссельного отверстия в текущий момент времени

$$f_2(t) = \frac{\dot{P}_1 R_s (F_0 + \Delta F) + R_s P_1 \Delta \dot{F}}{\mu P_1 \sqrt{\frac{2(P_2/P_1)(1-P_2/P_1)}{RT}}}. \quad (19)$$

Изменение площади дроссельного отверстия при наполнении полости при сверхкритическом истечении через сечение $f_1(t)$ противодавления из магистрали

$$f_1(t) = \frac{\dot{P}_1 R_s (F_0 + \Delta F) + R_s P_1 \Delta \dot{F}}{\mu P_1 \sqrt{1/(2RT)}}, \quad (20)$$

где принято $(P_2/P_1)_{кр} = 0,5$.

Выводы

1. Решена задача оптимального по быстродействию управлению пружинной (без дополнительных тормозных устройств), обеспечивающих перемещение неупругого объекта с приемлемыми предпосылками для управления упругим объектом.

2. Реализация оптимального управления с помощью упругого элемента, наполняемого сжатым воз-



духом, требует объем предварительного наполнения и управления дросселированием.

3. Объем предварительного наполнения V_0 заполняется воздухом до начала изменения площади поперечного сечения F_0 . Сравнение массового расхода во времени с расходом при истечении через дроссельное отверстие дает выражение для определения площади дроссельного отверстия в текущий момент времени.

4. Таким образом, все необходимые характеристики определены для управления упругим кинематическим соединением, которое может быть нагружено статическими и динамическими (периодическими, изменяющимися во времени) силами [6].

Библиографический список

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.

2. Феодосьев В.И. Упругие элементы точного приборостроения. М.: Оборонгиз, 1949. 344 с.

3. Чижиков В.И. Кинематика манипулятора с трубчатыми упругими звеньями постоянной кривизны главной оси // Математическое моделирование и управление в сложных системах: сб. научн. тр. Вып. 9 / Под общей ред. А.П. Хныкина. М.: МГУПИ, 2006. С. 137–144.

4. Чижиков В.И. Кинематическое исследование манипуляторов с упругодеформируемыми трубчатыми звеньями // Вестник МГАПИ. 2006. № 5. Сер. технические науки.

5. Чижиков В.И. Оптимизация рабочих операций при использовании манипулятора с телескопическим исполнительным органом // Математическое моделирование и управление в сложных системах. Под ред. С.М. Музыкаина и др. М.: МГАПИ, 2001. С. 153–157.

6. Чижиков В.И. Оценка динамической ошибки упругого манипулятора. Научн. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики". Книга Приборостроение. М.: МГАПИ, 2005. С. 139–142.

УДК 658.562: 621.9

Е.В. Давыдова, канд. техн. наук, В.В. Прейс, д-р техн. наук
(Тульский государственный университет)
E-mail: elen-davidova@mail.ru

Теоретические основы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором

Рассмотрены теоретические основы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для загрузки деталей формы тел вращения с неявно выраженной асимметрией торцов в сборочные технологические машины и линии.

Theoretical bases of designing of the disk toothed hopper feeding device with ring orientator for feeding of details of the form of bodies of rotation with implicitly expressed asymmetry of end faces in assembly technological machines and lines are considered.

Ключевые слова: автоматическая загрузка, бункерное загрузочное устройство.

Keywords: automation feeding, hopper feeding device.

Дисковое зубчатое бункерное загрузочное устройство (БЗУ) эффективно для автоматической загрузки в сборочные технологические машины и ли-

нии деталей формы тел вращения с асимметричными торцами и явно выраженным смещением центра масс вдоль продольной оси симметрии [1].

Однако при загрузке деталей с неявно выраженной асимметрией торцов, один из которых – цилиндрический, а другой – конический (рис. 1, а) или сферический (рис. 1, б) производительность и надежность известного зубчатого БЗУ резко снижаются. Это объясняется отсутствием у подобных деталей явно выраженного смещения центра масс (координата x_c) вдоль продольной оси симметрии.

Ранее для автоматической загрузки деталей с неявно выраженной асимметрией торцов при соотношении диаметров конического d_2 и цилиндрического d_1 торцов детали в пределах $0,7 < d_2 / d_1 < 0,8$, а также угла (2β) вершины конуса $20^\circ < 2\beta < 25^\circ$ (см. рис. 1, а) авторы предложили модернизированную конструкцию дискового БЗУ с радиальными гнездами и общим кольцевым ориентатором [2] и разработана аналитическая модель такого БЗУ [3].

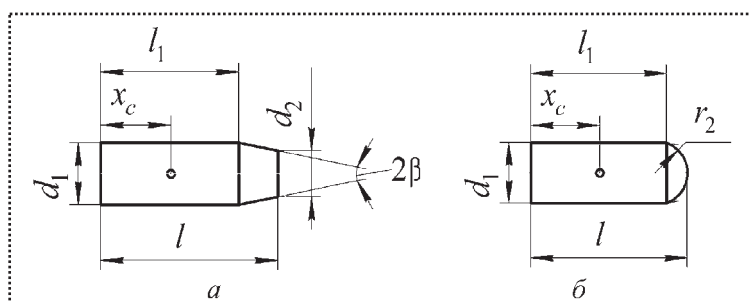


Рис. 1. Детали с неявно выраженной асимметрией торцов, один из которых – цилиндрический, а другой – конический (а) или сферический (б)

Было показано, что производительность модернизированного БЗУ при загрузке деталей с соотношением габаритных размеров (длины l детали и диаметра d_1 ее цилиндрической части) $3 \leq l/d_1 \leq 4$ может достигать 100...150 шт./мин. Однако при загрузке деталей с соотношением габаритных размеров $l/d_1 < 3$ надежность и производительность дискового БЗУ с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором резко снижалась.

Поэтому для надежной загрузки в сборочные технологические машины деталей с асимметричными торцами и соотношением габаритных размеров $2 \leq l/d_1 < 3$ была предложена усовершенствованная конструкция дискового зубчатого БЗУ с общим кольцевым ориентатором [4, 5].

Дисковое зубчатое БЗУ с общим кольцевым ориентатором (рис. 2) содержит бункер, образованный обечайкой 2 и неподвижным основанием 5, вращающийся диск 4 с радиальными пазми 1 и гнездами 7, чередующимися с зубьями 6. Общий кольцевой ориентатор 3, расположенный под вра-

щающимся диском 4, имеет кольцевой паз, поперечное сечение которого соответствует профилю асимметричного торца детали: для деталей с коническим торцом оно выполнено в форме усеченного конуса, а для деталей со сферическим торцом – в виде сегмента окружности.

В верхней части бункера БЗУ установлен копир 8 в виде сегмента окружности, с торцевым криволинейным профилем, направление подъема которого совпадает с направлением вращения диска с гнездами и зубьями, а угол подъема $\gamma < \arctg \mu$, где μ – коэффициент трения скольжения деталей о конструктивные элементы БЗУ.

При вращении диска 4 детали, засыпанные в бункер, ворошатся зубьями 6, пересыпаются и западают в гнезда 7. Детали, запавшие в гнезда асимметричным торцом вниз (рис. 3, а, в), погружаются полностью в паз кольцевого ориентатора, так как сечение паза повторяет профиль асимметричного торца детали.

Детали, запавшие в гнезда цилиндрическим торцом вниз (рис. 3, б, г), опираются им на верхний край паза кольцевого ориентатора, так как ширина b верхней части паза не превышает диаметр d_1 цилиндрического торца детали.

Запавшие детали перемещаются вращающимся диском в верхнюю часть бункера БЗУ. Детали, которые запали в паз кольцевого ориентатора асимметричным торцом вниз (см. рис. 3, а, в), удерживаются в нем, опираясь на верхний край гнезда (точка С), и перемещаются вращающимся диском в

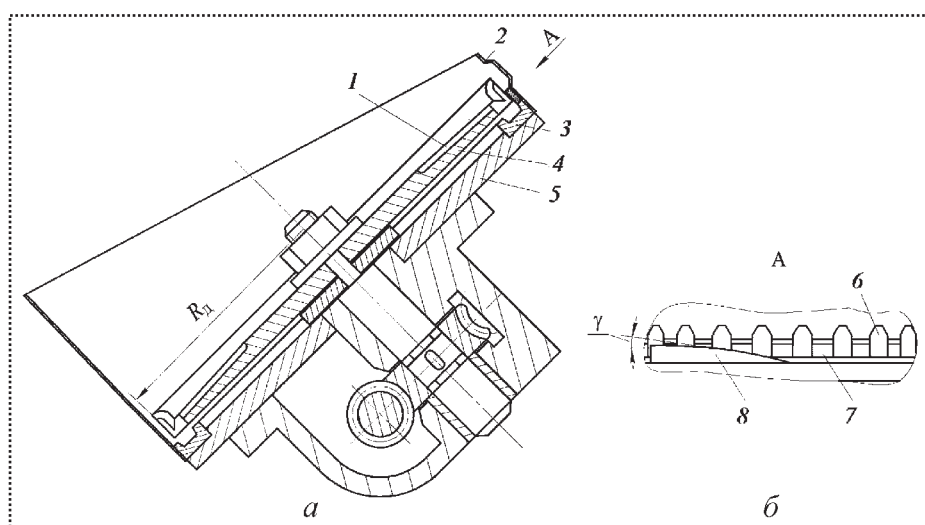


Рис. 2. Дисковое зубчатое бункерное загрузочное устройство с кольцевым ориентатором в разрезе по оси вращения диска с гнездами

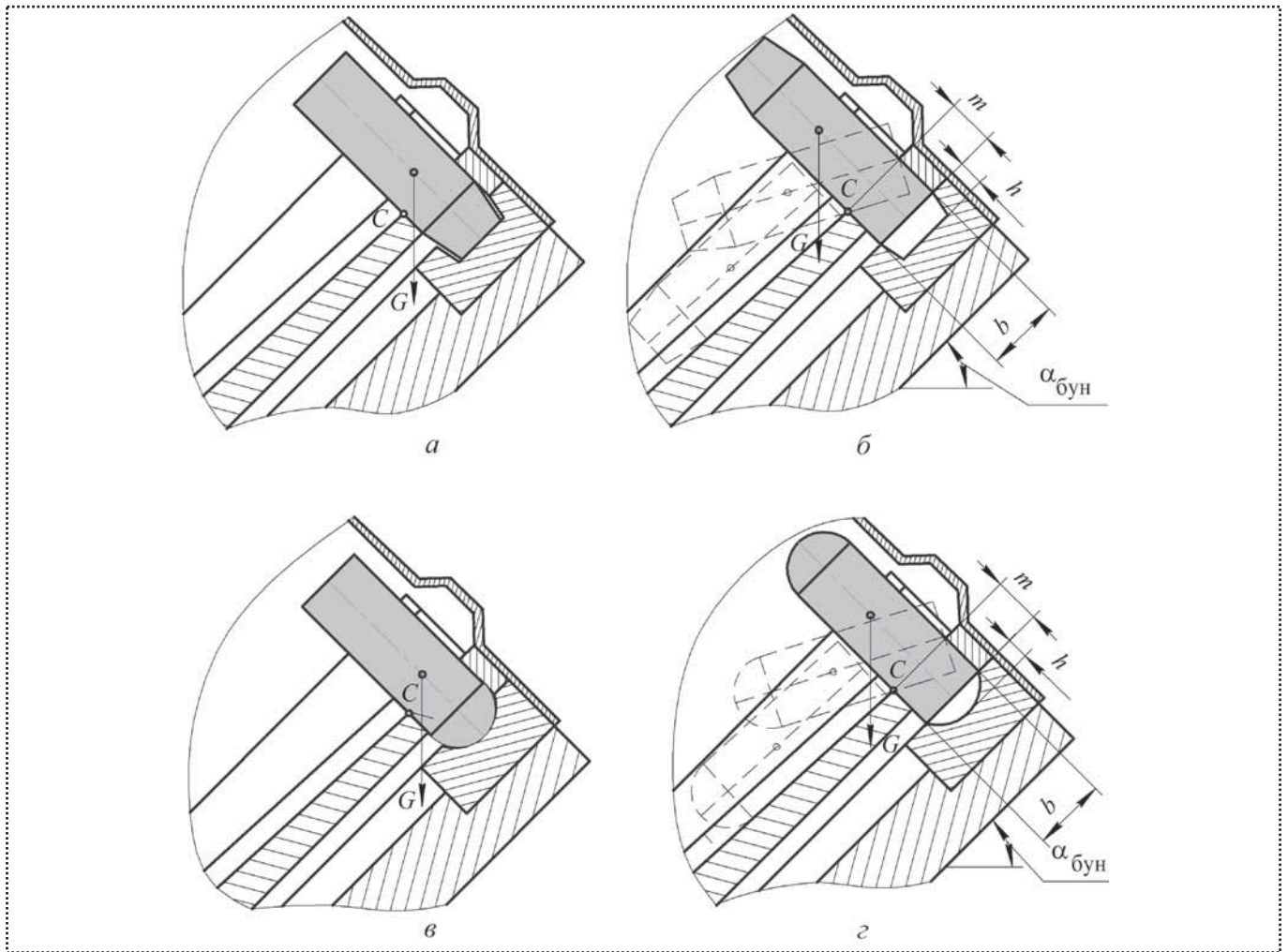


Рис. 3. Расчетные схемы к определению параметров кольцевого ориентатора для различных деталей:

a и *б* – с торцом в форме усеченного конуса (см. рис. 1, *a*); *в* и *г* – с торцом в виде сегмента окружности (см. рис. 1, *б*)

зону выдачи деталей из гнезд в приемник (на рис. 2 не показан).

Детали, которые запали в гнезда цилиндрическим торцом вниз (см. рис. 3, *б*, *г*), опираются им на верхний край паза ориентатора, при этом проекция силы тяжести детали G оказывается левее точки C , создавая, тем самым, опрокидывающий момент, поэтому в процессе вращения диска детали наклоняются в его гнездах и в верхней части бункера БЗУ "подхватываются" торцевым криволинейным профилем копира δ (см. рис. 2). Скользя по копиру цилиндрическими торцами, детали под действием силы тяжести G опрокидываются вокруг верхнего края гнезд (точка C) вращающегося диска и выпадают обратно в бункер БЗУ.

Расстояние m от верхнего края паза кольцевого ориентатора (см. рис. 3, *б*, *г*), обращенного к гнез-

дам вращающегося диска, до верхнего края гнезда (точки C) должно удовлетворять неравенству

$$\frac{1}{2}(l - h - d_1 \operatorname{ctg} \alpha_{\text{бун}}) > m > \frac{1}{2}(l - 2h - d_1 \operatorname{ctg} \alpha_{\text{бун}}), \quad (1)$$

где h – глубина паза кольцевого ориентатора;

$\alpha_{\text{бун}}$ – угол наклона основания бункера БЗУ к горизонтали.

Глубину h паза кольцевого ориентатора определяют, исходя из формы асимметричного торца детали.

Для деталей с коническим торцом поперечное сечение паза кольцевого ориентатора выполняют в форме усеченного конуса (см. рис. 3, *б*) глубиной

$$h \leq \frac{(b - 1,1d_2)(l - l_1)}{2(d_1 - d_2)}, \quad (2)$$



где l_1 – расстояние от цилиндрического торца детали до начала его конической части.

Для деталей со сферическим торцом поперечное сечение паза выполнено в виде сегмента окружности (рис. 3, в, г), при этом

$$h \leq 1,05 r_2 - \sqrt{1,1 r_2^2 - 0,25 b^2}, \quad (3)$$

где r_2 – радиус сферы асимметричного торца детали (см. рис. 1, б).

Производительность дискового зубчатого БЗУ определяется выражением

$$P_{\text{БЗУ}} = 60 \frac{v}{t} \eta, \quad (4)$$

где v – окружная скорость вращающегося диска БЗУ по оси гнезд, м/с;

t – шаг гнезд, м;

η – коэффициент выдачи БЗУ.

Шаг гнезд дискового зубчатого БЗУ

$$t = d_1 + \Delta t + \delta_n, \quad (5)$$

где Δt – зазор по шагу ($0,05 d_1 \leq \Delta t \leq 0,15 d_1$);

δ_n – толщина зубьев диска.

Для получения аналитической модели, описывающей зависимость коэффициента выдачи от окружной скорости гнезд БЗУ, авторы предложили новый комплексный подход [3, 6], заключающийся в следующем.

Аналитическую модель коэффициента выдачи будем искать в виде зависимости, предложенной проф. В.Ф. Прейсом на основе статистической обработки результатов экспериментальных исследований различных типов БЗУ:

$$\eta = \eta_{\text{max}} (1 - \varepsilon v^4), \quad (6)$$

где η_{max} – максимальная величина коэффициента выдачи БЗУ, соответствующая окружной скорости вращающегося диска с гнездами, близкой к нулю;

ε – коэффициент.

Аналитическое выражение для максимальной величины коэффициента выдачи η_{max} будем искать в виде произведения двух вероятностей

$$\eta_{\text{max}} = p_i p_c, \quad (7)$$

где p_i – вероятность нахождения детали на пути захватывающего органа (гнезда) в требуемом ориентированном положении;

p_c – вероятность того, что захвату деталей не мешает их взаимная сцепляемость.

Используя математические методы и подходы, предложенные проф. М.В. Медвидем, вероятность p_i нахождения детали на пути захватывающего органа в требуемом ориентированном положении определена выражением [6]

$$p_i = 1 - \left[1 - \frac{z_1 - z_3}{\sqrt{z_{10}^2 + 4(z_1 - z_3)^2}} + \frac{z_3 \left(\arctg \frac{0,5}{z_1 - z_3} - \arcsin \frac{\mu}{\text{tg} \alpha_{\text{бун}}} \right)}{\pi \sqrt{1 + 4 z_3^2}} \right]^p \times \left[1 - \frac{z_1 - z_3}{\sqrt{z_{10}^2 + 4(z_1 - z_3)^2}} + \frac{z_3 \left(\arcsin \frac{z_2}{\sqrt{1 + z_{11}^2}} - \arctg \frac{1}{z_{11}} \right)}{\pi \sqrt{1 + 4 z_3^2}} \right]^{r-p}, \quad (8)$$

где $z_1 = \frac{l}{d_1}$; $z_3 = \frac{x_c}{d_1}$; $z_{10} = \frac{d_2}{d_1}$; $z_2 = \frac{d_1 + \Delta t}{d_1} = 1,1 \dots 1,2$;

$$z_{11} = \frac{l_1}{d_1};$$

p – показатель, зависящий от длины отрезка линии стыка, свободного от деталей ($p = 1 \dots 3$);

r – число деталей, которые могут одновременно поместиться в зоне захвата на периферии вращающегося диска БЗУ, $r = \frac{\pi z_{12} \phi_3}{360}$. Здесь $z_{12} = \frac{2R_d}{d_1}$;

R_d – радиус вращающегося диска БЗУ (см. рис. 2, а);

ϕ_3 – угол, характеризующий зону захвата деталей, на протяжении которого возможно западание деталей в гнезда диска.

В работе [3] приведена методика определения величины угла ϕ_3 из анализа условий статического равновесия детали в радиальном пазу диска БЗУ с учетом угла его наклона к горизонтали, геометрических размеров детали и коэффициента трения скольжения детали об элементы дискового БЗУ.

Вероятность p_c того, что захвату деталей не мешает их взаимная сцепляемость, определим по известному выражению

$$p_c = 1 - \frac{\operatorname{arctg} \mu}{\pi} \frac{0,9 + 1,4 z_1}{1 + 2 z_1}. \quad (9)$$

Опираясь на известный факт, что при достижении некоторого предельного значения окружной скорости v_{\max} вращающегося диска с гнездами производительность БЗУ падает до нуля, коэффициент ε из выражения (6) может быть определен следующим образом:

$$\varepsilon = v_{\max}^{-4}. \quad (10)$$

Предположим, что производительность дискового зубчатого БЗУ будет приближаться к нулю, когда величина кинетической энергии, сообщенной детали вращающимся диском при неупругом ударе детали о край радиального паза, будет достаточна для ее выброса из паза. В этом случае ни одна деталь, находящаяся на поверхности вращающегося диска с радиальными пазами, не сможет занять благоприятного положения в радиальном пазу для последующего западания в гнездо диска. Удар кромки паза, движущегося с постоянной скоростью $v_{\max} = \text{const}$, приходится в боковую поверхность цилиндрической части детали, и она будет выброшена из паза, если (рис. 4)

$$\frac{m_d v_{\max}^2}{2} \geq m g \Delta h, \quad (11)$$

где m_d – масса детали;

Δh – глубина западания детали в радиальный паз.

Решая неравенство (11), найдем, что

$$v_{\max} \geq \sqrt{2 g \Delta h}. \quad (12)$$

Рассмотрим условие западания детали в радиальный паз диска: за время τ_r прохождения пазом пути x (рис. 4) деталь под действием силы тяжести G должна запасть в него на высоту Δh в течение времени τ_3 , т.е. $\tau_r \leq \tau_3$.

Принимая, что вращающийся диск движется с постоянной окружной скоростью, а деталь начина-

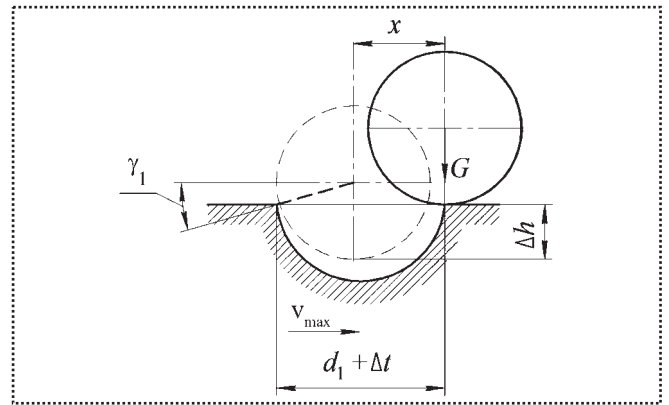


Рис. 4. Расчетная схема к определению предельной окружной скорости паза дискового зубчатого БЗУ

ет западать в паз с начальной нулевой скоростью (время западания в этом случае будет максимальным), получим неравенство:

$$\frac{x}{v_{\max}} \leq \sqrt{\frac{2 \Delta h}{g}}. \quad (13)$$

Пользуясь расчетной схемой, можем записать:

$$x = d_1 + \Delta t - 0,5 d_1 \cos \gamma_1; \quad (14)$$

$$\Delta h = \frac{d_1}{2} - \frac{d_1}{2} \sin \gamma_1 = \frac{d_1}{2} (1 - \sin \gamma_1), \quad (15)$$

где γ_1 – некоторый угол, определяющий направление силы удара.

Решая совместно выражения (12)...(15), получаем предельное значение окружной скорости вращающегося диска БЗУ, при которой происходит выбрасывание детали из радиального паза:

$$v_{\max} = \sqrt{g(d_1 + 0,8 \Delta t - 0,2 \sqrt{5d_1^2 - 4\Delta t^2})}. \quad (16)$$

Глубина, при которой начнется выбрасывание детали из паза,

$$\Delta h = 0,5 d_1 + 0,4 \Delta t - 0,1 \sqrt{5d_1^2 - 4\Delta t^2}. \quad (17)$$

Выражение (10) для определения коэффициента ε после подстановки формулы (16) примет вид:

$$\varepsilon = \frac{1}{(d_1 g + 0,8 g \Delta t - 0,2 g \sqrt{5d_1^2 - 4\Delta t^2})^2}. \quad (18)$$



После подстановки формулы (18) в формулу (6) аналитическая модель коэффициента выдачи может быть представлена выражением

$$\eta = \eta_{\max} \left[1 - \frac{v^4}{(d_1 g + 0,8 g \Delta t - 0,2 g \sqrt{5d_1^2 - 4 \Delta t^2})^2} \right] \quad (19)$$

Тогда аналитическая модель фактической производительности дискового зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором после подстановки формулы (19) в выражение (4) может быть представлена в виде

$$\Pi_{\text{БЗУ}} = \frac{60 v}{t} \eta_{\max} \times \left[1 - \frac{v^4}{(d_1 g + 0,8 g \Delta t - 0,2 g \sqrt{5d_1^2 - 4 \Delta t^2})^2} \right], \quad (20)$$

где шаг захватных гнезд t определяется по формуле (5), а максимальное значение коэффициента выдачи БЗУ — η_{\max} — выражениями (7)–(9).

Компьютерное моделирование коэффициента выдачи (19) и фактической производительности (20) дискового зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором было проведено для деталей с коническим торцом двух типоразмеров $l/d_1 = 2$ ($l_1 = 0,125$ м) и $l/d_1 = 2,5$ ($l_1 = 0,0175$ м) для двух значений коэффициента трения скольжения детали: $\mu = 0,3$ и $\mu = 0,4$.

Для всех типоразмеров деталей $d_1 = 0,01$ м, $d_2 = 0,006$ м, $2\beta = 30^\circ$, $x_c = l/2$.

Результаты компьютерного моделирования в виде графиков зависимости коэффициента выдачи и фактической производительности дискового зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором от окружной скорости вращающегося диска с гнездами представлены на рис. 5. Основные расчетные параметры БЗУ: $R_d = 0,185$ м, $\alpha_{\text{бвн}} = 50^\circ$, шаг гнезд $t = 0,02$ м при зазоре по шагу $\Delta t = 0,125 d_1$.

С целью проверки адекватности разработанной аналитической модели производительности дискового зубчатого БЗУ и общим кольцевым ориентатором были проведены экспериментальные исследования для деталей с коническим торцом двух указанных ранее типоразмеров при коэффициенте трения скольжения детали $\mu = 0,4$.

По результатам проведенных экспериментов с помощью стандартного пакета CurveExpert 1.3 построены аппроксимирующие функции $y(x) \equiv \Pi_{\phi}(v)$ зависимости фактической производительности БЗУ от окружной скорости гнезд в виде функции (4), в которой коэффициент η определяется выражением (6):

$$\text{при } l/d_1 = 2,0 \quad \Pi_{\phi} = \frac{60 v}{0,02} [0,424 (1 - 144,61 v^4)]; \quad (21)$$

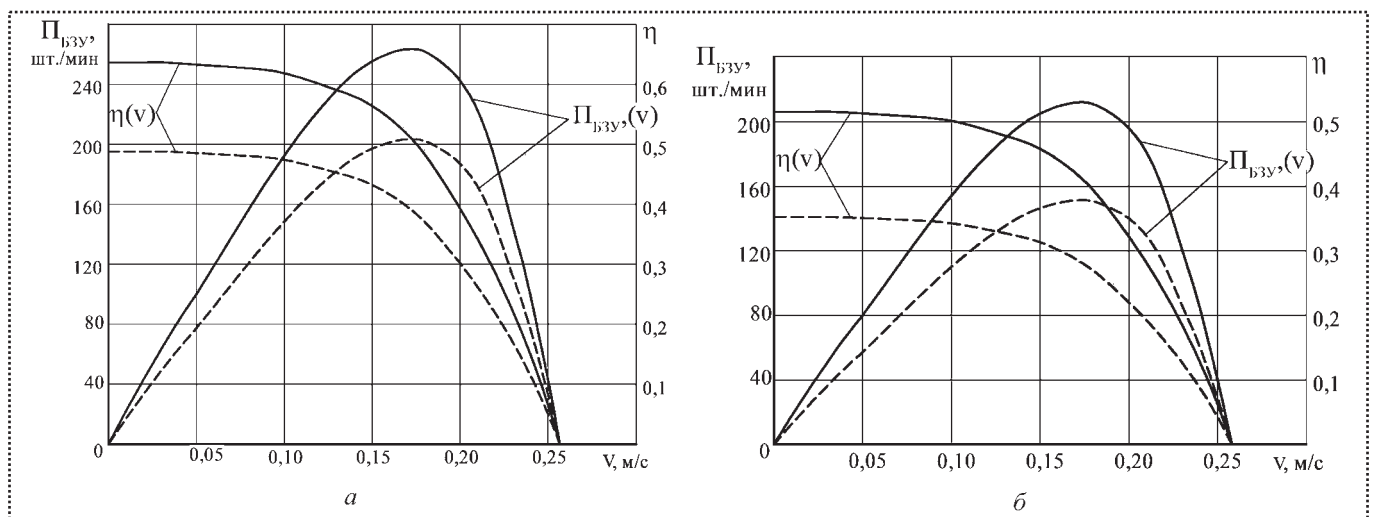


Рис. 5. Зависимости коэффициента выдачи и фактической производительности дискового зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором от окружной скорости вращающегося диска с гнездами для двух типоразмеров деталей при различных значениях коэффициента трения скольжения:

$a - z_1 = l/d_1 = 2,0$; $b - z_1 = l/d_1 = 2,5$

— $\mu = 0,3$; - - - $\mu = 0,4$



**Сравнение теоретических (числитель)
и экспериментальных (знаменатель)
значений основных параметров
дискового зубчатого БЗУ**

Типоразмер детали	v_{\max} , М/с	η_{\max}	$v_{\Pi_{\max}}$, М/с	$\Pi_{\Phi_{\max}}$, шт./мин
$l/d_1 = 2,0$	$\frac{0,254}{0,288}$	$\frac{0,497}{0,424}$	$\frac{0,170}{0,193}$	$\frac{202}{196}$
$l/d_1 = 2,5$	$\frac{0,254}{0,301}$	$\frac{0,387}{0,356}$	$\frac{0,170}{0,201}$	$\frac{157}{172}$

$$\text{при } l/d_1 = 2,5 \quad \Pi_{\Phi} = \frac{60 v}{0,02} [0,356 (1 - 121,95 v^4)]. \quad (22)$$

Приравнивая выражения (21)–(22) нулю и решая их относительно скорости v , получим предельные значения окружной скорости v_{\max} вращающегося диска БЗУ, при которой начинается выбрасывание детали из радиального паза. Дифференцируя уравнения (21)–(22) и приравнивая их нулю, получим соответственно уравнения

$$1 - 723,05 v^4 = 0; \quad (23)$$

$$1 - 609,46 v^4 = 0, \quad (24)$$

решениями которых будут значения окружной скорости гнезд $v_{\Pi_{\max}}$, при которых производительность БЗУ будет максимальна – $\Pi_{\Phi_{\max}}$.

Результаты вычислений основных параметров дискового зубчатого БЗУ по разработанной аналитической модели фактической производительности и приведенным эмпирическим зависимостям (21)–(24) представлены в таблице.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что относи-

тельное отклонение теоретических значений основных параметров БЗУ от их экспериментальных значений не превышает 20 %, что подтверждает адекватность разработанной аналитической модели производительности дискового зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором.

Таким образом, предложенная аналитическая модель производительности может быть использована при проектировании дисковых зубчатых БЗУ с кольцевым ориентатором для автоматической загрузки в сборочные технологические машины и линии деталей формы тел вращения с неявно выраженной асимметрией торцов и соотношением габаритных размеров $l/d_1 < 3$.

Библиографический список

1. Голубенко В.В., Давыдова Е.В., Прейс В.В. Совершенствование зубчатого бункерного загрузочного устройства для предметов обработки с неявно выраженной асимметрией торцов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2: в 2 ч. Ч. 1. Тула: изд-во ТулГУ, 2010. С. 27–34.
2. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Бункерное загрузочное устройство для деталей с неявно выраженной асимметрией торцов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 9. С. 57–65.
3. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 11. С. 23–30.
4. Патент 100942 РФ. МПК⁸ В 23 Q 7/02. Бункерное загрузочное устройство / В.В. Голубенко, Е.В. Давыдова, В.В. Прейс. Опубл. 10.01.2011. Бюл. № 1.
5. Патент 106577 РФ. МПК⁸ В 23 Q 7/02. Бункерное загрузочное устройство / В.В. Голубенко, Е.В. Давыдова, В.В. Прейс, Д.А. Провоторов. Опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20.
6. Голубенко В.В., Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. В 2-х ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 104–113.



УДК 658.527.011

А.А. Иванов, д-р техн. наук (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
E-mail: ivanov_aa@nntu.nnov.ru

Бесконтактный захват промышленного робота

Рассмотрен бесконтактный струйный захват промышленного робота, позволяющий осуществлять манипулирование объектами обработки и сборки, которые особо чувствительны к механическим повреждениям. Приведен расчет струйного захвата и определены условия равновесного и устойчивого положения плоской детали на захвате.

The contactless inkjet grip of the industrial robot that permits manipulating by some objects of machining and assembling which are very sensitive to mechanical damages is considered. The calculation of the inkjet grip is quoted. Besides the conditions of the balanced and sustained position of the flat detail on the grip are determined.

Ключевые слова: промышленный робот, бесконтактный струйный захват, неповреждающее манипулирование объектами.

Keywords: industrial robot, contactless inkjet grip, non-damaged manipulating objects.

При манипулировании объектами, особо чувствительными к механическим повреждениям, струйный захват имеет существенное преимущество перед вакуумным, так как он не соприкасается с функциональными поверхностями объекта, исключая тем самым их повреждение.

Струйный захват, или захват Бернулли, захватывает объект за счет эжектирующего действия радиального воздушного потока, протекающего в узкой щели между торцом захвата и поверхностью объекта.

Скорость воздушного потока в зазоре (а следовательно, и разрежение) устанавливают такой, чтобы присасывающая сила оказалась достаточной для захвата детали 2, обращенной к захватному устройству 1 развитой опорной поверхностью (рис. 1).

При захвате плоской детали между захватным устройством и объектом автоматически

устанавливается необходимый зазор δ . Одним из важных вопросов расчета струйного захвата является определение равновесного и устойчивого положения детали на захвате.

Условие равновесия имеет вид (рис. 1, а):

$$R = G + G_1$$

или в развернутом виде для круглой пластины радиусом r_d и на которую действует сила тяжести G :

$$G + \frac{\rho Q_3^2}{\pi r_k^2} + \frac{3\mu r_d^2 Q}{\delta^3} \left(1 - \frac{r_k^2}{r_d^2} \right) - \frac{\rho Q^2}{4\pi \delta^2} \ln \frac{r_d}{r_k} = 0, \quad (1)$$

где G_1 – сила давления струи на деталь;

ρ – плотность воздуха;

Q_3 – расход воздуха, втекающего в захват;

r_k – радиус вертикального канала захвата;

μ – динамический коэффициент вязкости воздуха;

Q – общий расход воздуха через захват.

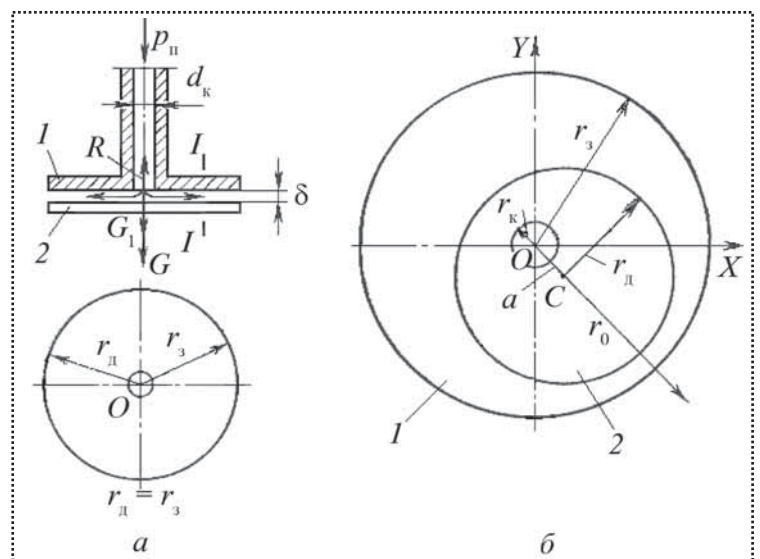


Рис. 1. Расчетные схемы симметричного (а) и асимметричного (б) размещения плоской детали на струйном захвате:

1 – захват; 2 – деталь; p_n – давление питания сжатого воздуха, подводимого к захвату; d_k – диаметр канала захвата; r_3 – радиус захвата



Значения сил R и G_1 определяют по методике, используемой для вакуумного захвата [1, 2].

Из уравнения (1) следует, что равновесие пластины для данного зазора δ возможно при объемном расходе Q_6 сжатого воздуха, определяемом из уравнения

$$Q_6^2 - \frac{12\pi(k^2-1)}{k^2(\ln k - 4k^2\xi^2)\xi} \times \\ \times Q_6 - \frac{4\pi G\xi^2}{\rho v^2(\ln k - 4k^2\xi^2)} = 0, \quad (2)$$

где $Q_6 = \frac{Q}{r_d v}$;

$\xi = \frac{\delta}{r_d}$ и $k = \frac{r_d}{r_k}$ – безразмерные величины;

v – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Уравнение (2) имеет смысл лишь в случае, если

$$\xi < \frac{\sqrt{\ln k}}{2k}. \quad (3)$$

Решая уравнение (2), находим

$$Q_6 = \frac{6\pi(k^2-1)}{k^2(\ln k - 4k^2\xi^2)\xi} + \\ + \sqrt{\frac{36\pi^2(k^2-1)^2}{k^4(\ln k - 4k^2\xi^2)^2\xi^2} + \frac{4\pi G\xi^2}{\rho v^2(\ln k - 4k^2\xi^2)}}. \quad (4)$$

Из неравенства (3) и выражения (4) следует, что существует интервал значений ξ , при которых пластина находится в равновесном состоянии, т.е. каждому значению зазора $\delta = r_d \xi$ соответствует определенный объемный расход $Q = r_d v Q_6$.

Полученные параметры δ и Q определяют равновесное положение пластины, но не позволяют судить о его устойчивости.

Для исследования устойчивости равновесного состояния выведем пластину из положения равновесия и запишем уравнение ее возмущенного движения:

$$\frac{G}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} = G + \frac{\rho Q^2}{\pi r_k^2} - \frac{\rho Q^2 \ln k}{4\pi(\delta+y)^2} + \frac{3\mu Q r_d^2 (k^2-1)}{k^2(\delta+y)^2}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения;

y – возмущение координаты δ , отсчитываемое от положения равновесия.

Линеаризуем уравнение (5), полагая возмущение y малой величиной.

Для этого разложим функции $(\delta+y)^{-2}$ и $(\delta+y)^{-3}$ в степенные ряды и, учитывая лишь члены до второго порядка малости включительно, получим

$$(\delta+y)^{-2} = \frac{1}{\delta^2} \left(1 - \frac{2y}{\delta}\right); \quad (\delta+y)^{-3} = \frac{1}{\delta^3} \left(1 - \frac{3y}{\delta}\right).$$

Подставим полученные равенства в уравнение (5), поделим все его слагаемые на массу детали $m = \frac{G}{g}$ и с учетом условия (1) запишем

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 y,$$

где ω – круговая частота колебаний пластины,

$$\omega = \sqrt{\frac{9\mu Q r_d^2 g (k^2-1)}{k^2 G \delta^4} - \frac{\rho Q^2 g \ln k}{2\pi G \delta^3}}.$$

Частота колебаний ω будет тем больше, чем меньше расход Q , обеспечивающий устойчивое равновесие пластины.

Колебательное движение пластины вызывает изменение давления p в зазоре, которое увеличивается при движении пластины к захвату и уменьшается при удалении от него на величину

$$dp_6 = \left[\frac{\ln k Q_6^2}{2\pi^2 \xi^3} - \frac{9(k^2-1)Q_6}{\pi k^2 \xi^4} \right] d\xi,$$

где $p_6 = \frac{p r_d^2}{\rho v^2}$.

В зависимости от знака ω^2 возможны два случая движения пластины: если $\omega^2 > 0$, то пластина колеблется около положения устойчивого равновесия, если $\omega^2 < 0$, то она отрывается от захвата.

Интерес представляет, очевидно, первый случай, из записи которого в развернутой форме получим

$$Q < \frac{18\pi r_d^2 v (k^2-1)}{k^2 \delta \ln k} \quad \text{или} \quad Q_6 < \frac{18\pi(k^2-1)}{\xi k^2 \ln k}. \quad (6)$$

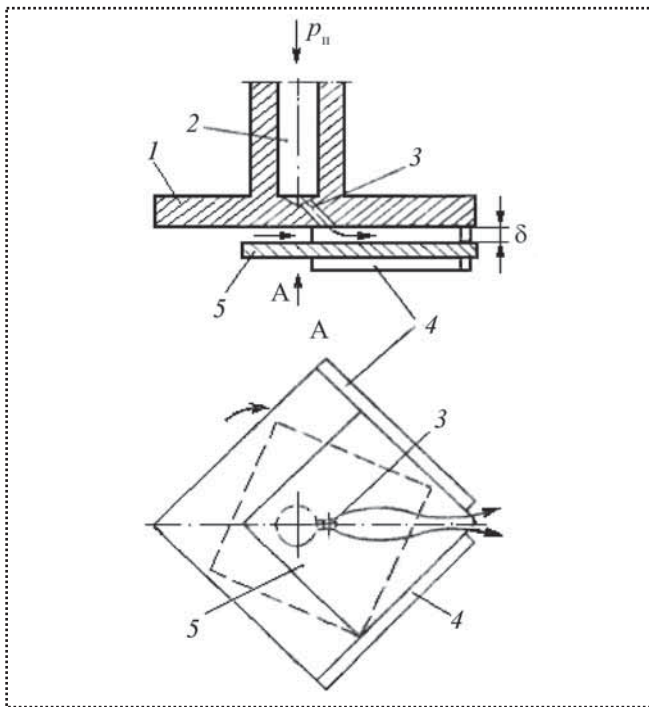


Рис. 2. Схема базирования квадратной пластины на струйном захвате:

1 – захват; 2 – воздушный канал; 3 – наклонное сопло; 4 – базирующая стенка; 5 – пластина

Используя выражение (4) и второе неравенство (6), после некоторых преобразований найдем величину зазора δ в зависимости от k :

$$\delta = r_d \sqrt{\frac{162 \rho v^2 (k^2 - 1)^2}{k^2 G \ln k} + A}, \quad (7)$$

$$\text{где } A = \sqrt{\frac{162^2 \rho^2 v^4 (k^2 - 1)^4}{k^4 G^2 \ln^2 k} - \frac{27 \pi (k^2 - 1)^2 \rho v^2}{k^4 G \ln k}}.$$

Выражения (6) и (7) определяют значения зазора δ и расхода Q , при которых обеспечивается устойчивое равновесие пластины на струйном захвате в направлении его оси.

Закон движения центра масс C пластины относительно захвата в горизонтальной плоскости имеет вид (рис. 1, б)

$$r_0 = a \operatorname{ch} \lambda t, \quad (8)$$

где a – прямая, соединяющая центр O канала захвата и центр масс C детали.

Из уравнения (8) следует, что даже при очень малом смещении a центра масс пластины от оси за-

хвата она начинает быстро удаляться от центра O со скоростью v_d :

$$v_d = a \lambda \operatorname{sh} \lambda t = a \sqrt{\frac{3 \mu g Q}{G \delta^2}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{3 \mu g Q}{G \delta^2}} t,$$

$$\text{где } \lambda = \sqrt{\frac{3 \mu g Q}{G \delta^2}}.$$

Горизонтальное движение детали относительно захвата при $a \neq 0$ можно использовать для ее базирования на захвате.

На схеме, представленной на рис. 2, подводимый воздушный канал 2 струйного захвата 1 заканчивается наклонным соплом 3, которое формирует плоский поток в зазоре δ в направлении окна, образованного базирующими стенками 4.

Произвольно ориентированная пластина 5 на захвате (штриховой контур) под действием момента $M(F_\tau)$ вязких сил F_τ будет поворачиваться вокруг вертикальной оси захвата и одновременно перемещаться в диагональном направлении к окну, пока не окажется прижатой к боковым стенкам 4. Базирование деталей на струйном захвате осуществляется в процессе перемещения руки манипулятора.

Другая модификация струйного захвата обеспечивает ориентацию круглой пластины 1 по угловой координате (рис. 3, а). Захват имеет эксцентричный канал 2 для подвода сжатого воздуха и свободно установленные фиксирующий палец 3 и ограничительную кромку 4, которые утапливаются при опускании захвата на деталь.

При течении воздуха в зазоре $\delta \approx 0,2$ мм он попадает во впадины 5 на торце захвата, изменяет свое направление и ударяется о поверхность пластины 1. Благодаря смещению струи от оси захвата возникает крутящий момент $M(F_\tau)$ сил вязкого трения, под действием которого пластина начинает поворачиваться вокруг вертикальной оси.

При этом фиксирующий палец 3 скользит по поверхности пластины и в момент совпадения западает в ориентирующее отверстие, фиксируя пластину от дальнейшего поворота. Для отсечки детали при укладке в технологическую позицию необходимо прекратить подачу сжатого воздуха в канал захвата. Конструкция такого захвата показана на рис. 3, б.

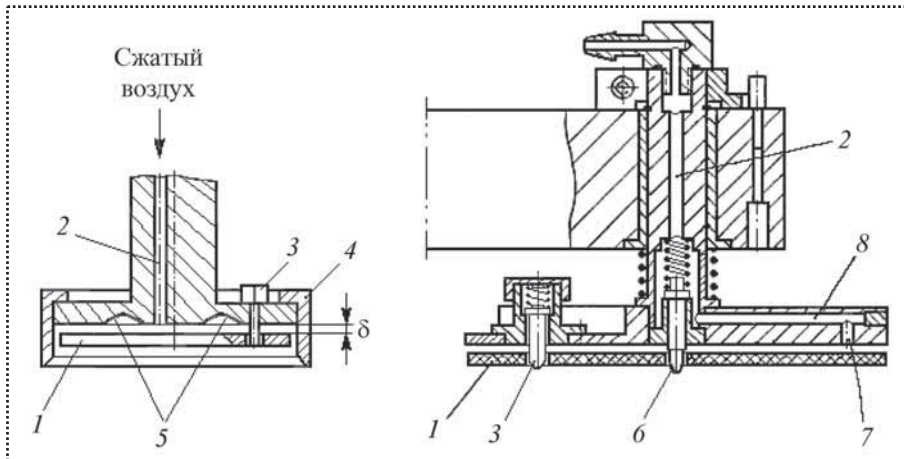


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и конструкция (б) бесконтактного струйного захвата с угловой ориентацией круглой пластины с эксцентричным отверстием:

1 – круглая пластина; 2 – канал для подачи сжатого воздуха; 3 – фиксирующий палец; 4 – ограничительная кромка; 5 – впадина на торце захвата; 6 – центрирующий штифт; 7 – наклонное сопло; 8 – радиальный канал для выхода сжатого воздуха

Вывод

Оснащение промышленных роботов бесконтактными струйными захватами позволяет осуществлять неповреждаемую подачу легко деформируемых деталей на технологических операциях сборки, касетирования и сортировки. Это особенно важно в приборостроении, например, в производстве интегральных микросхем и других изделий микроэлектроники. Подобные технические решения существенно упрощают и удешевляют системы комплексной ав-

томатизации производства, в которых важная роль отводится роботам, заменяющим человека на монотонных, тяжелых и вредных операциях технологического цикла.

Библиографический список

1. Иванов А.А. Основы робототехники. М.: Форум, 2012. 224 с.
2. Иванов А.А. Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки. М.: Форум, 2012. 352 с.

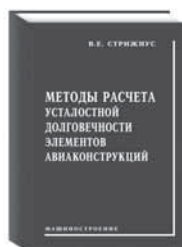


ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАКОНСТРУКЦИЙ

В.Е. Стрижнук

2012 г. Объем 272 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-94275-652-9 Цена 400 р.



Изложены методы и процедуры, позволяющие выполнять инженерные расчеты усталостной долговечности типовых конструктивных элементов самолета на этапах эскизного и рабочего проектирования.

Предлагаемые методы синтезируют наиболее апробированные теоретические и практические положения ряда известных отечественных и зарубежных методов расчета усталостной долговечности элементов авиационных конструкций и позволяют значительно упростить расчеты и обеспечить их приемлемую точность.

При разработке методов и процедур использованы, в частности, некоторые положения методов и процедур расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций фирм Boeing и Lockheed, представленные в открытых публикациях (на английском языке) бывшего главного инженера испытательных лабораторий фирмы Boeing Ульфа Горансона (Ulf Goranson) и бывшего старшего инженера-исследователя фирмы Lockheed Майкла Ню (Michael Niu).

Для инженеров ОКБ и научных работников НИИ, занимающихся практическими расчетами усталостной долговечности элементов авиационных конструкций, может быть также полезна студентам и аспирантам авиационных вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.757

Б.Ю. Житников, д-р техн. наук (Владимирский юридический институт),
Ю.З. Житников, д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: kgta_tms@mail.ru

Многошпиндельное переналаживаемое заворачивающее устройство

Представлено конструктивное решение многошпиндельного переналаживаемого заворачивающего устройства.

The constructive decision the multi-spindle readjusted screwing up device is presented.

Ключевые слова: многошпиндельное заворачивающее устройство, переналадка.

Keywords: multi-spindle screwing device, readjustment.

Для обеспечения механизированной сборки изделий, скрепляемых резьбовыми соединениями, создают многошпиндельные заворачивающие устройства.

При многономенклатурном производстве или смене собираемых изделий, в которых изменяются параметры затяжки резьбовых соединений, параметры самих резьбовых деталей их тип, например, шпилечные соединения на болтовые (винтовые), их число, а также межцентровые расстояния отпадает надобность в дорогостоящем сборочном оборудовании.

В целях повышения универсальности сборочного оборудования, возможной его переналадки на новые размеры, параметры и число одновременно собираемых резьбовых соединений предлагается конструктивное решение переналаживаемого многошпиндельного заворачивающего устройства.

Устройство (рис. 1) состоит из стационарной рамы 1, к которой шарнирно крепится пневмоцилиндр 2 для перемещения гайковерта 6 к собираемому узлу. Верхняя плита 5 гайковерта 6 жестко крепится к штоку 3 пневмоцилиндра 2, а через нижнюю плиту 48 проходят выходные валы

гайковерта, кинематически связанные с карданными валами 24 и 25, 31, 40 и 47. На промежуточной плите 8 гайковерта закреплен двигатель 7 (электрический или пневматический), на выходном валу которого жестко закреплена шестерня 9, кинематически связанная с зубчатым колесом 10, на противоположном конце вала колеса 10 закреплена шестерня 11, взаимодействующая с зубчатым колесом 62. На противоположном конце вала колеса 62 жестко закреплена центральная шестерня 60, взаимодействующая с четырьмя зубчатыми колесами – 13, 12, 51, 59.

Вращательное движение разделяется по четырем кинематическим цепям:

- по первой – вращение от центральной шестерни 60 передается зубчатому колесу 13 и далее через муфту предельного момента 18, через зубчатые передачи 21, 20 и 22, 23 на карданный вал, состоящий из звеньев 24 и 25, шпинделю 26 и патрону 27 с разрезными резьбовыми кулачками для удобства захвата, удержания и раскрытия кулачков после заворачивания и затяжки шпилек;
- по второй кинематической цепи вращение от центральной шестерни 60 через зубчатое колесо 12, муфту предельного момента 15, зубчатые передачи 35, 34 и 33, 32 передается карданному валу 31, к шпинделю 30 и патрону 29;
- по третьей кинематической цепи вращение от центральной шестерни 60 через зубчатое колесо 61, муфту предельного момента 57, зубчатые передачи 36, 37 и 38, 39 передается карданному валу 40, шпинделю 41 и патрону 42;
- по четвертой кинематической цепи вращение от центральной шестерни 60 через зубчатое колесо 59, муфту предельного момента 54, зубчатые передачи 52, 51 и 49, 50 передает-

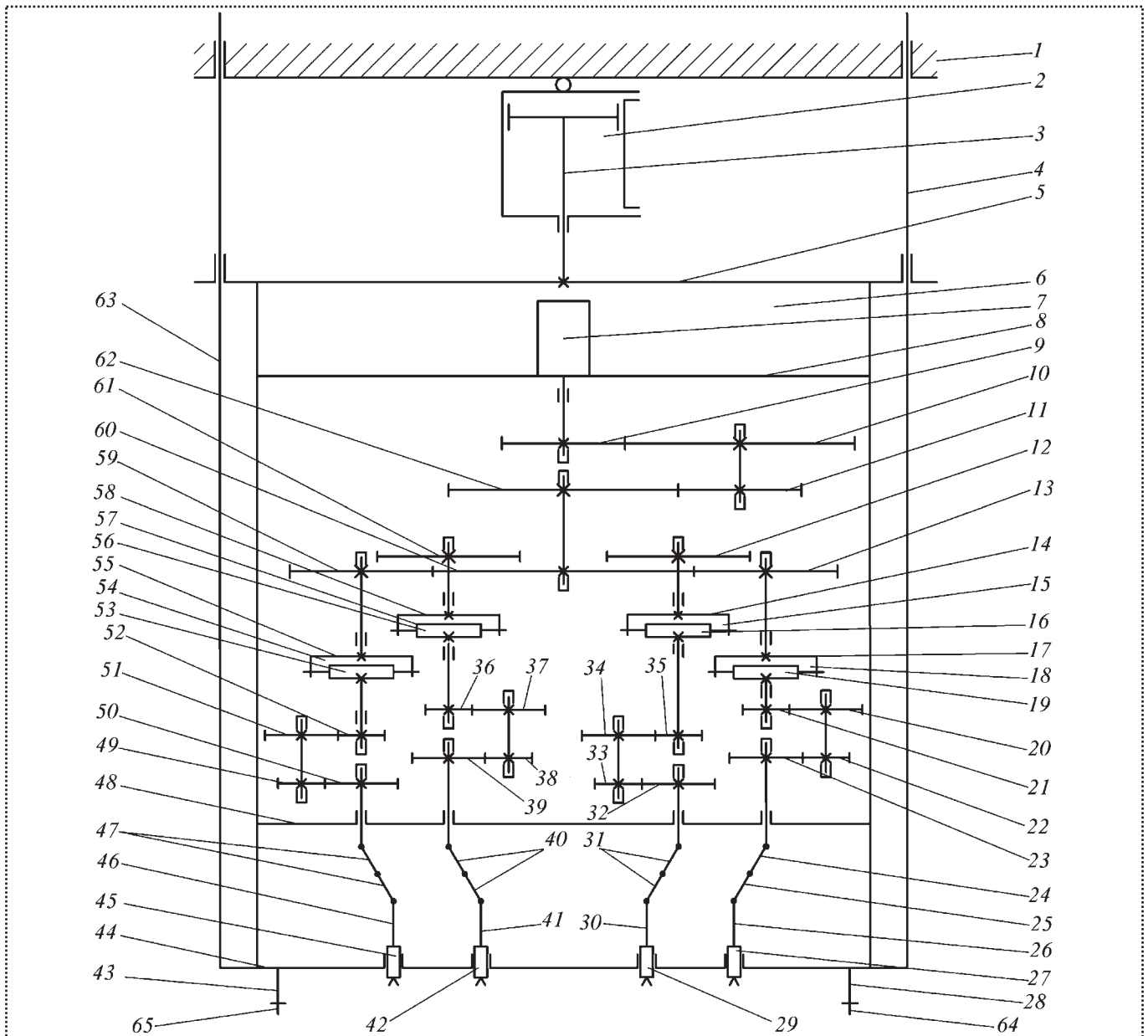


Рис. 1. Переналаживаемое многшпindleное устройство для завинчивания резьбовых деталей

ся карданному валу 47, шпинделю 46 и патрону 45.

Для направленного перемещения гайковерта 6 имеются две направляющие штанги 4 и 63. На нижней плите 44 с возможностью регулирования положения расположены штыри 28 и 43, оканчивающиеся сменными штифтами 64 и 65.

Для передачи под углом вращения к шпинделям 26, 30, 41, 46 имеются карданные валы 24, 25, 31, 40, 47, которые шарнирно осями 75 (рис. 2) прикреплены к выходным валам 74 и гайковерта

с одной стороны и осями 70 к шпинделям 26, 30, 41, 46. Карданные валы состоят из двух частей валов 24 и 25, шарнирно осью 76 соединенных между собой.

Для регулирования длин карданных валов при установке требуемых межцентровых расстояний осей шпинделей составной вал 25 можно укорачивать или удлинять за счет резьбового соединения с последующим законтриванием его гайкой 79.

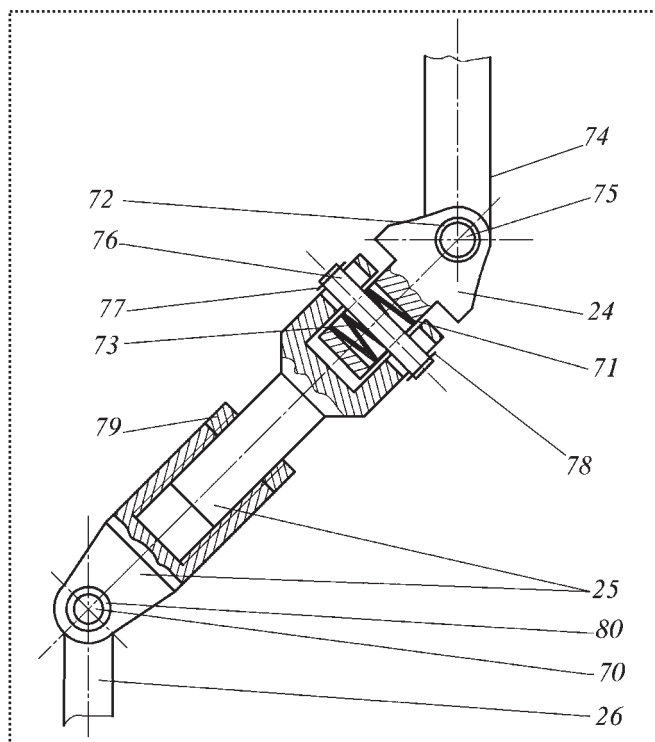


Рис. 2. Карданный вал с компенсацией смещений

Для исключения смещения осей в шарнирах и быстрой переналадки предусмотрены пружинные быстросъемные шайбы 72, 77, 78 и 80.

Для обеспечения компенсации перекосов осей и осевых смещений шпинделей карданные валы имеют на деталях 24, 25 пазы, по которым могут перемещаться оси 76. Для обеспечения среднего положения осей 76 относительно пазов с двух сторон ее установлены пружины 71, 73.

Для изменения положения шпинделей с патронами 27, 29, 42 и 45 при регулировании требуемого межосевого расстояния для качественного завинчивания и затяжки шпилек и регулирования положения штифтов 64 и 65 относительно штифтовых отверстий на собираемых узлах, которые обеспечивают предварительную ориентацию гайковерта относительно собираемого узла, имеется плита 44 (рис. 3). Плита представляет собой диск, в котором имеется квадратное окно Б для установки и крепления в нем четырех планок 66, 68, 71 и 73 с возможностью их перемещения вдоль оси X, в которые в свою очередь уста-

навливают и крепят пластины 67, 69, 70 и 72 с отверстиями под патроны 27, 29, 42 и 45 с возможностью их перемещения вдоль оси Y. Диаметр отверстий должен быть больше диаметров патронов на удвоенную величину возможного относительного смещения осей резьбовых отверстий на собираемом узле. Величина относительного смещения осей не должна быть больше возможного раскрытия разрезных кулачков патронов, т.е. не более 3,5 мм.

Гайковерт работает следующим образом. Медленно выпускается сжатый воздух из нижней полости пневмоцилиндра 2 и включается вращение двигателя 7. Корпус гайковерта 6 под действием собственной силы тяжести опускается и подводится к собираемому узлу (условно не показан), в резьбовые отверстия которого наживлены шпильки. Вращение шпинделям от двигателя 7 передается через зубчатые передачи 9, 10 и 11, 62 к центральной шестерне 60, которая одновременно взаимодействует с зубчатыми колесами 13, 12, 61 и 59. Происходит разделение вращений по четырем кинематическим цепям (см. ранее).

Вращающиеся патроны 27, 29, 42, 45 своими разрезными кулачками доориентируются отно-

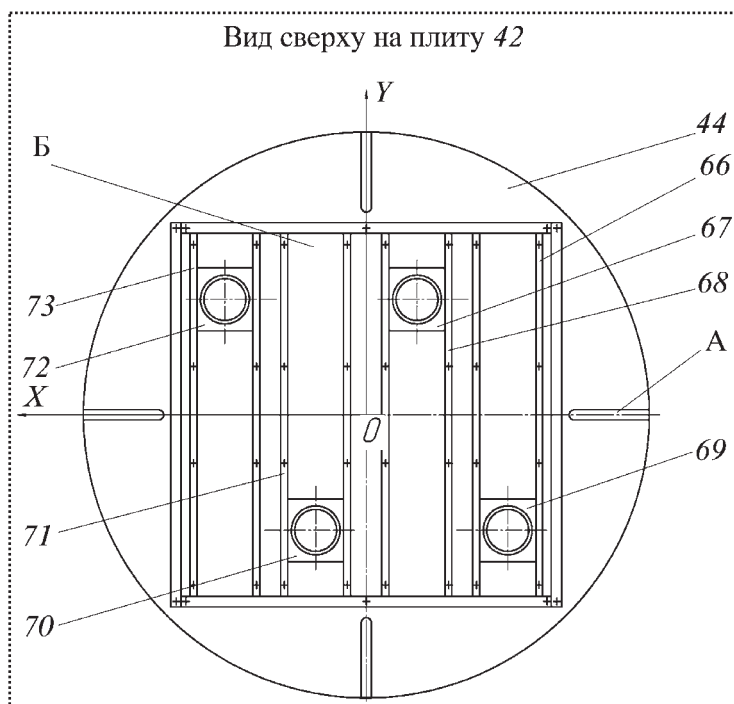


Рис. 3. Вид на переналаживаемую плиту



сительно наживленных шпилек и захватывают их за резьбовые части.

Начинается процесс завинчивания с непрерывной доориентации патронов относительно ввинчиваемых шпилек за счет карданных валов с учетом наличия в их подвижных элементах зазоров и пружин, позволяющих изменять угол перекоса и относительное смещение осей. По мере окончания завинчивания и затяжки шпилек резко возрастают моменты сопротивления вращению в каждой из кинематических цепей. Срабатывают муфты предельного момента 18, 15, 57, 54, т.е. начнется проскальзывание полумуфт 17 и 19, 14 и 16, 58 и 56, 55 и 53 и прекратится передача момента затяжки на шпильки. Процесс завинчивания и затяжки шпилек завершен.

Подается воздух в нижнюю полость пневмоцилиндра 2 и гайковерт отводится от собираемого узла.

Процесс переналадки шпинделей на новые положения с учетом изменения межцентровых расстояний осуществляется следующим образом. Предварительно под гайковерт на специально ориентированное основание (условно не показано) устанавливается новый собираемый узел с наживленными шпильками. На плите 44 раскрепляются штыри 28, 43 со штифтами 64, 65. Штыри по пазам А смещают таким образом, чтобы их штифты попали в штифтовые отверстия узла. Затем штыри жестко закрепляют. В случае необходимости изменения диаметральных размеров штифтов их выворачивают и вворачивают в резьбовые отверстия штырей новые штифты. Раскрепляют подвижные планки 66, 68, 71 и 73 и

пластины 67, 69, 70 и 72, а также вынимают оси 76 в карданных валах 24 и 25, 31, 40, 47. Планки и пластины перемещают таким образом, чтобы патроны разрезными резьбовыми кулачками оделись на резьбовую часть наживленных шпилек. После совмещения патронов относительно шпилек закрепляют планки и пластины. В случае замены патронов на другие, у которых изменен наружный диаметр, заменяют планки 67, 69, 70 и 72. Длину карданных валов 24, 25, 31, 40 и 47 изменяют путем ввинчивания или вывинчивания валов 25 (см. рис. 2), добиваясь такого положения, при котором шпиндели 26, 30, 41 и 46 с патронами 27, 29, 42 и 45 одетыми резьбовыми кулачками на наживленные шпильки, имели возможность в пределах упругой податливости карданных валов за счет перемещения осей 73, поджатых пружинами 71 и 73 по пазам валов свободно смещаться в плоскостях, перпендикулярных шпинделям, в любом направлении.

В случае, если необходимо перенастраивать гайковерт на завинчивание трех или двух шпилек, то любые из колес 13, 12, 61 и 59 выводят из зацепления с центральной шестерней 60, а их патроны снимают со шпинделей.

Как видно из описания, устройство действительно обладает универсальностью, учитывая, что базовые варианты завинчивающих устройств могут иметь 5, 6, 8, 10 шпинделей и их можно перенастраивать на произвольное число. При незначительном увеличении затрат на базовый вариант получаем значительную экономию от универсальности устройства.

СБОРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕЕВ

УДК 621.792; 62-50: 62-525: 628

В.С. Безменов, д-р техн. наук (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН),
А.В. Игнатов, канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
E-mail: avllig@yandex.ru

Методика проектирования автоматизированных устройств нанесения и дозирования клеевых составов для сборочных производств с клеевыми соединениями

Рассмотрена методика проектирования систем автоматизированного дозирования клеевых составов для сборочных производств с клеевыми соединениями. Поэтапно проанализированы свойства клеевых составов, тип и конструкция клеевого соединения, составлено техническое задание на разработку системы автоматизированного дозирования. В зависимости от сочетания указанных в техническом задании основных параметров исходных данных (условия отверждения клеевого состава, его вязкости и диапазона дозирования) проведен выбор типовой схемы системы автоматизированного дозирования.

The technique of design of systems of the automated dispensing of glue structures for assembly productions with glue connections is considered. Step by step properties of glue structures is analyzed, type and a design of glue connection, the specification on development of the system of the automated design is assignment. Depending on a combination of key parameters of basic data specified in the specification (conditions of an otverzhdniye of glue structure, its viscosity and dispensing range) a choice of the standard scheme of system of the automated design is selected.

Ключевые слова: клей, клеевое соединение, технологический процесс сборки, методика проектирования, система автоматизированного дозирования, конструкция клеевого соединения, техническое задание, вязкость, диапазон дозирования, типовая схема.

Keywords: glue, glue joint, assembling, design technique, automated mixed glue metering machine, glue joint design, development requirements, viscosity, metering range, typical design.

В современном машиностроении используют большое число клеевых соединений на основе целого ряда клеевых составов (КС) как различной химической природы, так и различного агрегатного со-

стояния (жидкости различной вязкости, пастообразные составы, твердые вещества).

Технологический этап нанесения и дозирования КС активно влияет на экономическую и эксплуатационную составляющие проектирования клеевого соединения в изделии.

Конкурентоспособность изделия напрямую зависит от себестоимости ее сборки. Сложность устройства, а, следовательно, планируемые капиталовложения определяют тип производства. При увеличении серийности экономически оправданы более сложные системы. Стоимость устройств нанесения может колебаться в зависимости от выбранной схемы устройства, точности и производительности комплектующих агрегатов и механизмов.

Эксплуатация соединения определяется качеством сборки. На этапе нанесения КС необходимо обеспечить сплошность его нанесения, от чего зависит отсутствие непроклеенных участков.

Важной характеристикой качества выполнения соединения является наличие воздушных пузырей в клеевом шве, а также различных инородных тел, которые являются концентраторами напряжений. От концентраторов напряжений свое развитие получают трещины в клеевом шве, что резко сокращает долговечность соединения, а следовательно, и изделия в целом.

На этапе нанесения КС решают вопросы точности соединения. От выполнения расчетных размеров клеевого соединения зависит метод обеспечения точности изделия.

Необходимо обеспечить заполнение микронеровностей поверхности детали клеевым составом. Качественное заполнение микронеровностей приводит к увеличению площади контакта, прочности соединения, сокращает число и величину концентраторов напряжений.



Правильно подобранная технология нанесения КС позволяет создать капиллярное напряжение в клеевом шве, способствующее торможению развития трещины.

Технологические приемы сборки КС позволяют увеличить прочностные характеристики конструкции, ее долговечность, повысить герметичность клеевого соединения.

Этап нанесения и дозирования клеевых композиций в технологическом процессе сборки оказывает влияние на качество сборки изделия. Последовательность выполнения этого процесса, его трудоемкость и себестоимость будут зависеть от выбранных автоматизированных устройств нанесения и дозирования. Их выбор зависит от конструктивных особенностей соединения, физико-механических параметров и химической природы отверждения КС.

Методика проектирования автоматизированного устройства нанесения и дозирования КС содержит две составляющие:

- анализ технологического цикла сборки изделия, на основе которого вырабатывают технологические и технические требования к проектируемому автоматизированному устройству дозирования;
- проектирование собственно системы автоматизированного дозирования (САД) с требуемыми техническими параметрами.

Первая составляющая состоит из рассматриваемых далее **последовательно выполняемых этапов**, в которых анализируются указанные особенности клеевого соединения, делается вывод о предпочтении различных конструктивных решений и производительности рассматриваемых устройств и составляется техническое задание на разработку САД.

На *первом этапе* анализируют характеристику производства и уровень требуемой автоматизации процесса нанесения и дозирования.

Тип производства и требуемое качество соединения определяют уровень требуемой автоматизации процесса. Обычно различают ручное, механизированное, автоматизированное и автоматическое нанесение.

Метод *ручного нанесения* применяют в экспериментальном, единичном и мелкосерийном производствах. Для нанесения КС в ручном режиме используют кисти, шпатели, ракля, стержни, ножницы, сита (для сыпучих клеев) и т.п. При ручном на-

несении его осуществляет непосредственно рабочий, задействованный в процессе сборки клеевого соединения.

При *механизированном нанесении* используют простейшие приспособления, позволяющие повысить качество сборки и упростить выполнение сборочных переходов, например, ручные дозаторы, пневматические устройства подачи высоковязких составов, устройства подачи в труднодоступные места и т.п.

Автоматизацию нанесения КС применяют в случаях требования высокой производительности, применения опасных для здоровья человека клеев или их компонентов, требования высокого качества клеевого соединения, которое нельзя обеспечить ручным нанесением. Каждая из предпосылок является достаточной.

Различают автоматизированное и автоматическое нанесение. При *автоматизированном нанесении* человек привлекается к управлению процессом, а при *автоматическом* – устройство нанесения и дозирования работает в автономном режиме по заданной программе.

Под характеристикой производства во многом понимают и его оснащенность. На данном этапе также анализируют возможность применения конструктивных исполнений автоматизированных устройств нанесения и дозирования КС, таких как наличие централизованной пневматической магистрали, стабильность электроснабжения и т.п. Особое внимание уделяют квалификации персонала.

На этом этапе выбирают тип привода, уровень автоматизации устройства, его производительность, точность и степень защищенности.

На *втором этапе* анализируют вид КС.

Различают два основных вида КС – терморезистивные и термопластичные.

Терморезистивные КС выпускают в жидком и пастообразном состояниях. При отверждении они переходят в необратимое нерастворимое и неплавкое состояние, их невозможно применять повторно. При разборке соединение с терморезистивным клеем разрушается.

Термопластичные КС выпускают только в твердом состоянии, они представляют собой упругий материал различного цвета, лишенный способности прилипать к поверхности. Такой материал приобретает свойства клея с высокой вязкостью после разогрева до жидкого состояния, а при его



остывании образуется клеевой шов. При необходимости разборки соединения его нагревают, после чего клей вновь будет пригоден для применения.

На данном этапе решается вопрос о необходимости наличия системы подогрева КС в емкости хранения и на всем пути транспортирования к месту сборки. Такая система накладывает определенные требования на всю конструкцию автоматизированного устройства нанесения и дозирования КС, от нее требуется обеспечение стабильного поддержания заданной температуры.

На *третьем этапе* анализируют жизнеспособность КС.

Жизнеспособность КС – это время, в течение которого КС обеспечивает свои адгезивные и когезивные свойства при сборке соединения. Все сборочные работы с КС рекомендуется произвести в течение срока его жизнеспособности, что гарантирует обеспечение его эксплуатационных характеристик при соблюдении технологии и условий сборки. Применение КС по истечении срока жизнеспособности приводит к снижению прочностных характеристик клеевого соединения вплоть до его полной потери.

Жизнеспособность КС отсчитывают с начала создания тех условий, при которых запускается механизм его отверждения. Для каждого КС характерна своя жизнеспособность, что определяется химической природой состава, механизмом его отверждения и окружающими условиями, которые способны ускорить или замедлить процесс отверждения.

Поэтому при проектировании автоматизированного устройства нанесения и дозирования КС следует учитывать жизнеспособность последнего и обеспечивать условия, при которых отверждение КС невозможно в процессе эксплуатации дозирующего устройства. Если, все же, в процессе его эксплуатации возможно наступление условий отверждения КС, то такое устройство должно дополняться системой блокировки подачи КС на позицию сборки и очистки гидросистемы устройства.

Как правило, жизнеспособность КС является известным параметром, поэтому система блокировки и очистки может включаться в работу по сигналу реле времени, которое срабатывает по истечении срока жизнеспособности.

На данном этапе решается вопрос о необходимости системы очистки и ее конструкции.

На *четвертом этапе* анализируют химическую природу отверждения КС. Классифицируя КС, применяемые в машиностроении, по химической природе отверждения можно выделить пять групп.

В *первую группу* входят КС, которые отверждаются в отсутствие кислорода воздуха. К ним относятся, например анаэробные составы и некоторые акриловые. Такие клеи применяют в малых зазорах, когда к склеиваемым деталям прикладывают контактное давление, позволяющее вытеснить воздух из клеевого шва.

При необходимости применения таких составов в увеличенных зазорах (более 0,2 мм) прибегают к увеличению их вязкости. У акриловых и анаэробных составов реакцию отверждения значительно ускоряет непосредственный контакт с металлами, особенно активной группы, к которой относятся медь и ее сплавы, кобальт, марганец, никель, железо.

При проектировании устройств нанесения и дозирования КС для первой группы отверждения необходимо обеспечить его постоянный контакт с кислородом воздуха. Необходимо также избегать длинных траекторий транспортирования по замкнутому трубопроводу, исключить контакт с металлами, особенно активной группы, стараться использовать открытые емкости для хранения дозируемого состава, обеспечив присутствие кислорода воздуха. Рекомендуемый материал трубопровода – полиэтилен с толщиной стенок не более 2 мм.

Несоблюдение этих требований может привести к раннему отверждению, образованию затвердевших клеевых пробок в транспортной системе, прерывистой подаче состава.

Во *вторую группу* следует внести КС, отверждение которых происходит благодаря контакту с влажной воздухом. К ним относят, например, цианакрилатные составы и некоторые полиуретановые.

Применение таких составов требует некоторой выдержки после нанесения для запуска процесса отверждения. Особенно это важно при соединении деталей с большой площадью нанесения. Отсутствие открытой выдержки в этом случае может привести к тому, что клей отвердеет лишь по периферии соединения и прочность такого соединения будет значительно отличаться от расчетной.

При проектировании устройств нанесения и дозирования для второй группы отверждения необходимо предложить замкнутую систему транспортирования КС, которая обеспечит ее изоляцию от



контакта с влагой даже в воздушной смеси. В случае применения сжатого воздуха в таких устройствах необходимо предусмотреть систему его предварительной осушки, отсутствие пористых материалов, использовать герметичный трубопровод без изломов.

Несоблюдение этих требований может привести к раннему отверждению, образованию затвердевших клеевых пробок в транспортной системе.

К *третьей группе* можно отнести те КС, отверждение которых происходит после испарения или принудительного высушивания входящей в их состав дисперсионной среды, например летучих растворителей, спиртов, или воды. К ним относят некоторые каучукосодержащие и полиуретановые клеи, клеи на основе латексов, поливинилацетата, поливинилового спирта, канифоли, а также некоторые составы на основе фенолоформальдегидных олигомеров и элементоорганических соединений.

Для качественного применения таких составов также требуется открытая выдержка. В ряде случаев прибегают к применению повышенной температуры для инициации процесса испарения, что ускоряет отверждение.

При проектировании устройств нанесения и дозирования для третьей группы отверждения следует избегать применения пористых материалов, способствующих испарению летучих составляющих. Транспортная система должна быть выполнена замкнутой, что уменьшит вероятность преждевременного отверждения из-за испарения дисперсионной среды. В устройствах нанесения и дозирования на всем пути транспортирования к месту сборки не должно быть свободных объемов и открытых полостей, следует избегать также турбулентного и прерывистого движения КС. Как правило, все элементы устройства должны быть выполнены из материалов, стойких к растворителям, а в отдельных случаях — в пожаробезопасном исполнении.

Несоблюдение этих требований приводит к раннему отверждению, значительному повышению вязкости и образованию затвердевших клеевых пробок в транспортной системе.

В *четвертую группу* входят КС, отверждение которых происходит под воздействием ультрафиолетового облучения. В машиностроении наибольшее распространение получили акриловые составы ультрафиолетового облучения. Применение таких

клеев требует того, чтобы одна из деталей соединения была выполнена из материала, пропускающего ультрафиолетовые лучи.

После сборки соединения происходит его облучение, что позволяет обеспечить прочностные характеристики в короткие сроки. Для облучения используют специальные лампы, которые подбирают по требуемой интенсивности и стоимости.

Проектирование устройств нанесения и дозирования для четвертой группы отверждения во многом схоже с первой группой. Отличительной особенностью в данном случае является то, что материалы, используемые при изготовлении устройств, не должны пропускать ультрафиолетовые лучи. Необходимо также исключить контакт с металлами, особенно активной группы.

Несоблюдение этих требований приводит к раннему отверждению, образованию плотных клеевых пробок в транспортной системе, прерывистой подаче состава.

К *пятой группе* относят КС, отверждение которых происходит в присутствии различных веществ, запускающих химические реакции.

Как правило, это двухкомпонентные составы и процесс отверждения начинается после смешения компонентов. К ним относят эпоксидные и полиэфирные композиции, клеи на основе карбамидоальдегидных олигомеров, а также некоторые композиции на основе каучуков, фенолоформальдегидных олигомеров, элементоорганических соединений, полиуретанов и полиэфиров.

При использовании рассматриваемых КС особое внимание уделяют соблюдению пропорций компонентов. Жизнеспособность приготовленных перемешанных составов крайне ограничена, что накладывает свои временные требования к процессу нанесения.

Из-за ограниченной жизнеспособности рассматриваемых композиций их различные компоненты рекомендуют транспортировать отдельно, а перемешивание производить непосредственно перед применением. Благодаря такой природе отверждения отдельные компоненты довольно инертны и их транспортирование не вызывает особых сложностей.

В ряде случаев компоненты могут содержать горючие и агрессивные составляющие, что накладывает ограничение на применяемый в устройстве материал. Однако для таких композиций характерно большое число составляющих для каждого ком-



понента. Причем некоторые из них находятся в твердом нерастворенном состоянии. При транспортировании таких компонентов необходимо предусматривать закрытый трубопровод без изломов постоянного сечения и стабильную скорость подачи.

Несоблюдение этих требований приводит к расслоению композиции, снижению адгезии, образованию пузырей, которые являются концентраторами напряжений в клеевом шве.

На четвертом этапе определяют принципиальную схему устройства нанесения и дозирования, а также материалы, из которых рекомендуется изготавливать для нее детали.

На **пятом этапе** анализируют структурный состав КС.

По структурному составу КС можно классифицировать на гомогенные и гетерогенные.

Гомогенные КС – это составы, однородные по плотности и химической структуре по всему объему.

Гетерогенные КС – это составы, содержащие зоны различной плотности, допускающие взвеси из твердых фаз, фиксируемых визуально.

Клеевые составы одной и той же химической природы, в зависимости от рецептуры, назначенной эксплуатационными функциями, могут быть как гомогенными, так и гетерогенными.

Наибольшую сложность при проектировании устройств нанесения и дозирования представляют гетерогенные составы. Они не предназначены для долгого хранения, так как более тяжелые составляющие начинают оседать, что меняет общую структуру. Это сказывается на прочностных характеристиках соединения. Если предусматривается долгое хранение состава, то необходимо предусмотреть перемешивающие устройства, устанавливаемые в расходных емкостях.

При проектировании устройств нанесения и дозирования для гетерогенных КС необходимо исключить резкие перегибы транспортной системы, задать плавную скорость подачи без пульсаций потока, обеспечить постоянство сечения трубопровода и ламинарное течение по нему.

Несоблюдение этих требований может привести к расслоению КС, снижению адгезии и потере эксплуатационных характеристик.

На этом этапе выбирают вид привода, траекторию трубопровода к месту сборки и систему подачи КС.

На **шестом этапе** анализируют вязкость КС.

Вязкость колеблется в широких пределах от текучих составов, способных заполнить капиллярные микропоры в деталях (например, специальные анаэробные), до твердых тел разной формы (например, клеи-расплавы). Поэтому принято говорить о твердых, пастообразных и жидких КС.

Твердые КС всегда расплавляют перед применением до состояния вязкотекучей жидкости. Температура расплавления зависит от рецептуры клея.

Пастообразные КС транспортируют в состоянии поставки или обеспечивают принудительный разогрев. Разогрев применяют в том случае, если необходимо уменьшить вязкость состава. Температура разогрева регламентируется его физико-химическими свойствами: она не должна вызывать выкипание составляющих.

При транспортировании высоковязких КС, как правило, ужесточаются требования к жесткости конструкции.

Жидкие КС всегда транспортируют в состоянии их поставки.

На этом этапе определяют диаметр трубопровода, мощность привода, необходимость принудительного подогрева состава, жесткость конструкции.

На **седьмом этапе** выбирают требуемый режим подачи КС.

Различают три режима работы дозирующих устройств, применяемых в машиностроении – капельный, струйный, распыления.

Выбор режима зависит от конструкции клеевого соединения, площади и траектории нанесения КС. Главным образом эти факторы влияют на рабочие органы устройства нанесения – выходные сопла, насадки и форсунки.

Выбор КС иногда предопределяет режим работы дозирующего устройства. Так, цианакрилатные клеи наносят в капельном режиме, а каучуковые и полиуретановые, как правило, – в струйном.

Однако тип КС не является в данном случае определяющим фактором. Наоборот, – на выбор КС влияют те же факторы, что и на выбор режима работы. Поэтому КС широкого применения могут наноситься в разных режимах. Режим работы назначают в технологическом процессе сборки.

На этом этапе определяют конструкцию выходного рабочего органа устройства нанесения,



уточняют технические характеристики узлов привода.

На *восьмом этапе* рассчитывают требуемую дозу КС, которую подают в позицию сборки.

Под *дозой* понимают фиксированный объем КС, непрерывно подаваемый на позицию сборки и необходимый для выполнения одного соединения.

Величина дозы определяется конструкцией соединения и технологией ее выполнения. Качественные характеристики и ответственность соединения диктуют требуемую точность дозирования, т.е. размер колебания дозы в пределах одной сборочной партии сборочных единиц.

От точности дозирования зависит расход КС, что оказывает определенное влияние на себестоимость сборочной операции. Точность дозирования также влияет на внешний вид соединения, наличие наплывов и подтеков, вытесненных из клеевого шва. Для качественных соединений в этом случае предусматривают дополнительную операцию очистки, что увеличивает трудоемкость и себестоимость сборочного процесса.

На данном этапе определяют конструктивные элементы устройства управления нанесением, отвечающие за точность дозирования, а также габариты и конфигурацию выходного сопла.

На *девятом этапе* анализируют число компонентов в КС.

В машиностроении используют, как правило, одно- и двухкомпонентные КС, но бывает и большее число компонентов. Наибольшую сложность вызывают многокомпонентные КС. Главное преимущество многокомпонентных КС – длительный срок хранения в несмешанном состоянии.

Многокомпонентность характерна для терморезактивных КС. Термопластичные КС, как правило, однокомпонентные в условиях поставки.

В случае использования многокомпонентных терморезактивных КС в устройство нанесения должна быть включена система смешения компонентов.

Как указывалось ранее, из-за ограниченной жизнеспособности смешивание компонентов рекомендуют производить непосредственно перед применением. Как правило, смешивание компонентов производят в объемных или массовых частях, в зависимости от заданной технологическим регламентом рецептуры.

Системы смешивания обычно регламентируют свою работу по временному показателю. Для каждой многокомпонентной композиции характерно свое время перемешивания компонентов, что зависит от их вязкости и составляющих. От качества перемешивания в значительной мере зависят эксплуатационные характеристики соединения. До поступления компонентов в систему смешивания для каждого компонента КС проектируют устройство транспортирования в соответствии с перечисленными этапами.

Системы смешивания КС можно классифицировать на пассивные и активные.

Пассивные системы смешивания обеспечивают смешивание компонентов за счет энергии, заданной им при транспортировании к месту сборки. Смешивание происходит за счет взаимного проникновения компонентов без помощи устройств, требующих дополнительных энергозатрат.

Преимущество пассивных смесительных узлов заключается в их низкой себестоимости, малом подготовительно-заключительном времени к работе, простоте обслуживания, отсутствии требований их очистки. При выходе из строя такие конструкции заменяют на основе метода полной взаимозаменяемости.

Активные системы смешивания обеспечивают принудительное перемешивание компонентов, используя собственный привод. Такие системы позволяют задавать собственные режимы смешения для применяемой композиции, например, время, частоту вращения перемешивающих лопаток и т.п.

Активные системы смешивания обладают большей стоимостью, требуют определенной подготовки к работе и периодического обслуживания. Однако они обеспечивают стабильное качество смешения компонентов, что особенно важно при использовании высоковязких композиций или композиций, где компоненты имеют разное агрегатное состояние.

На данном этапе выбирают класс и конструкцию системы смешивания компонентов.

На *десятом этапе* анализируют тип КС и его характеристики.

В машиностроении применяют большое разнообразие КС – цилиндрические, внахлест, тавровые, точечные, плоскостные и т.д. Эти соединения могут иметь различную пространственную конфигурацию и различную геометрию клеевого шва.



Анализируя эти параметры, рассчитывают конструкцию узлов перемещения рабочих органов устройства дозирования КС.

При анализе конструктивных особенностей соединения определяют площадь покрытия детали клеевым составом, ее пространственную конфигурацию, требуемую траекторию. При выполнении клеевых соединений возможно нанесение КС на большие площади, которые измеряются квадратными метрами (сэндвич-панели), или напротив, — нанесение на точечный участок детали (например, при сборке электронных плат). При герметизации корпусных деталей герметик наносят по сложной пространственной траектории сплошным тиксотропным валиком.

На этом этапе проектируют устройство перемещения рабочего органа для нанесения КС или детали относительно него, уточняют конструкцию рабочего органа и режимы его перемещения.

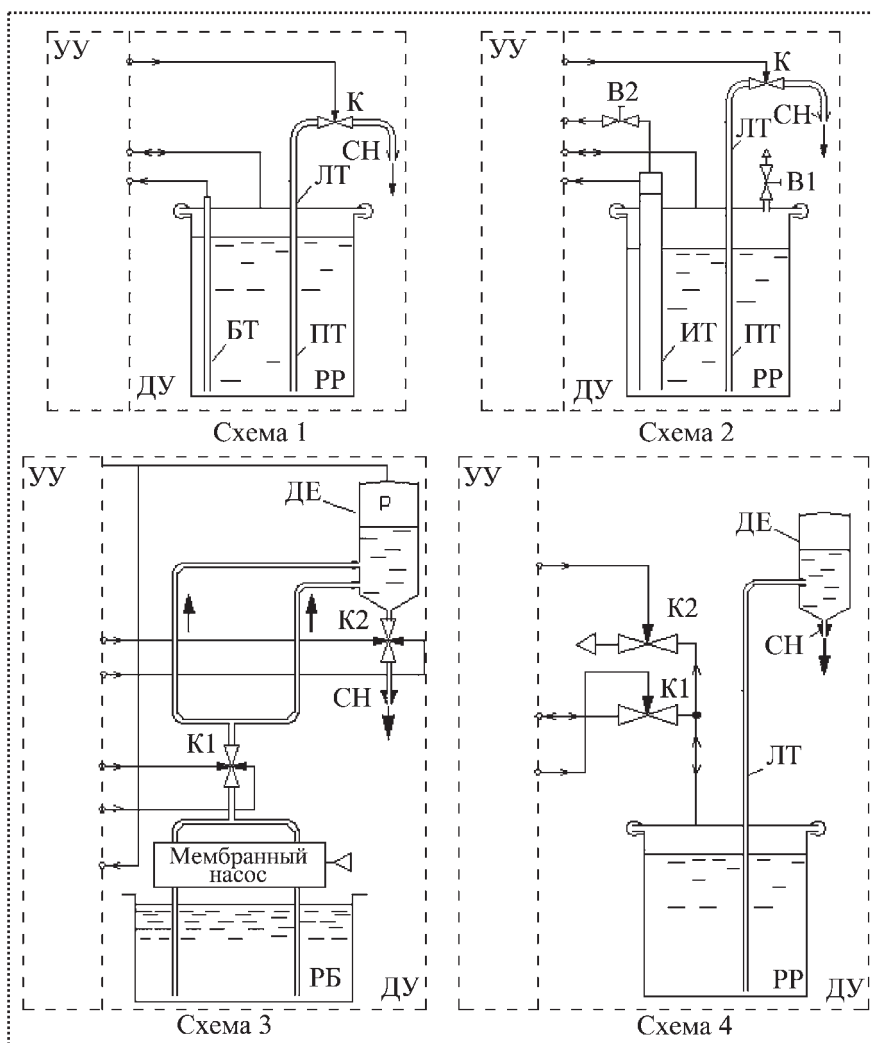
На последнем — **одиннадцатом этапе** проектирования производят анализ конструкции устройства нанесения и дозирования КС на технологичность и составляют техническое задание на проектирование автоматизированного устройства нанесения и дозирования КС.

В предыдущем номере журнала в статье "Типовые системы автоматизированного дозирования однокомпонентных термореактивных клеевых составов для сборочных производств с клеевыми соединениями" были представлены разработанные авторами принципиальные схемы построения типовых САД клеевых термореактивных однокомпонентных составов.

Типовые САД — это системы, разработанные эквивалентно серийно выпускаемым изделиям, которые могут быть использованы без существенной доработки их принципиальной схемы, в соответствии с задачами конкретного технологического процесса сборки изделия.

На рисунке показаны блочные схемы типовых САД, в которых используют принципы дозирования с контролем отмеривания дозы по косвенным параметрам: по времени и по давлению сжатого воздуха в промежуточной (дозировочной) емкости.

Выбор схемы построения типовой САД является первоочередным этапом проектирования индивидуальной системы дозирования для конкретного сборочного производства с учетом особенностей



Блочные схемы типовых САД:

Схемы 1, 2, 3 — с контролем отмеривания дозы по времени: схема 1 — с измерительным преобразователем (ИП) барботажного типа; схема 2 — с ИП манометрического типа; схема 3 — с подачей КС из открытого РБ; схема 4 — безарматурная САД с контролем отмеривания дозы по давлению сжатого воздуха в дозировочной емкости;

ДУ — дозирующее устройство; УУ — устройство управления; РР — расходный резервуар; БТ — барботажная трубка; ПТ — питающая трубка; ЛТ — линия транспортирования КС; К, К1, К2 — пневмоклапаны; СН — сливной наконечник В1, В2 — шаровые запорные вентили с двухсторонним пневмоприводом



Выбор типовой схемы САД

Сочетания опций ИД			Схема типовой САД / точность дозирования, \pm % от заданного значения объема дозы	Дополнительные требования к системе
A1	B1	V1	Схема 1/ $\pm 0,5$ %	Расходный резервуар (РР) – из полиэтилена с толщиной стенок 2 мм, гидрокommуникации – трубка ПВХ 10/2, сливной наконечник – пластик
A1	B1	V2	Схема 2/ $\pm 0,5$ %	
A2	B1	V1	Схема 1/ –	Дополнительный фильтр-влагоотделитель на линии пневмопитания УУ. При работе САД по схеме 4 объем РР должен быть рассчитан на всю программу сборки с учетом заданной дозы – при порционном дозировании, и с учетом заданного времени дозирования – при непрерывном дозировании.
	B1	V2	Схема 2/ –	
	B2	V1, V2	Схема 3 – для гомогенных составов/ ± 1 % Схема 4 – для гетерогенных составов / ± 1 %	
A3	B1	V1	Схема 1/ –	Расходный резервуар и сливной наконечник – из нержавеющей стали с толщиной стенок 3 мм, гидрокommуникации – трубка ПФХ. При работе с пожаро- и взрывоопасными составами – пожаровзрывобезопасное исполнение САД (временное устройство в составе УУ – пневматическое) При работе САД по схеме 4 РР должен быть оборудован перемешивающим устройством, а его объем должен быть рассчитан на всю программу сборки с учетом заданной дозы – при порционном дозировании и с учетом заданного времени дозирования – при непрерывном дозировании.
	B1	V2	Схема 2/ –	
	B2	V1, V2	Схема 3 – для гомогенных составов; Схема 4 – для гетерогенных составов	
A4	B1	V1	Схема 1/ –	Расходный резервуар и гидрокommуникации ДУ должны быть защищены от ультрафиолетовых лучей. При работе САД по схеме 4 РР должен быть оборудован перемешивающим устройством, а его объем должен быть рассчитан на всю программу сборки с учетом заданной дозы – при порционном дозировании и с учетом заданного времени дозирования – при непрерывном дозировании.
	B1	V2	Схема 2/ –	
	B2	V1, V2	Схема 3 – для гомогенных составов; Схема 4 – для гетерогенных составов	

процесса. Такая система может отличаться от типовой в результате доработки принципиальной технологической схемы и алгоритма управления дозированием.

Методика выбора схемы построения типовой САД основана на анализе технического задания на автоматизацию процесса сборки и установлении основных параметров исходных данных (ИД), касающихся системы дозирования, в зависимости от сочетания которых может быть проведен рациональный выбор принципа отмеривания дозы и соответствующая принципиальная схема типовой САД.

В связи с представленными характеристиками КС, используемых в сборочных производствах, в качестве основных параметров ИД выбраны следующие:

Условия отверждения: А1–А4, в соответствии с нумерацией групп отверждения КС (см. ранее).

Диапазон дозирования делится условно на две группы: В1 – малые и средние (до 500 мл – при порционном дозировании и 25 л/ч – при непрерывном дозировании); В2 – большие (более 500 мл или 25 л/ч).

Диапазон вязкости состава условно делится на два диапазона: малая и средняя (от 10^{-3} до 1 Па·с) и высокая – (более вязкие составы), которые обозначаются соответственно В1 и В2.

Согласно предлагаемой методике, посредством анализа возможных (рациональных) сочетаний основных параметров ИД (Аi, Bj, Vk), которые получаются путем их последовательного перебора, производится выбор принципиальной схемы типовой



САД и формулируются дополнительные требования к системе, исходя из особенностей процесса их отверждения.

Результаты применения данной методики отражены в таблице.

В таблице не указаны следующие сочетания параметров ИД, которые считаются нерациональными по следующим причинам:

A1–B2 – клеи, применяемые в малых зазорах, т.е. в диапазоне малых и средних доз;

A5–Bj–Vk – их отверждение происходит при смешивании компонентов и на выбор однокомпонентной системы не влияет.

Заключение

Достоинством предложенных типовых систем является их универсальность по отношению к операциям непрерывного и порционного дозирования. Это означает, что одну и ту же САД можно ис-

пользовать как устройство непрерывного или порционного дозирования.

Представленные в статье схемы построения САД для жидких терморезистивных КС могут быть использованы и при работе с пастообразными и термопластичными составами. При этом схемы построения типовых САД должны быть дополнены системами нагрева, стабилизации и контроля температуры КС.

Принципы построения систем дозирования многокомпонентных КС могут быть реализованы на базе дублирования типовых однокомпонентных систем с добавлением в них узла смешения компонентов.

Принципиальная схема типовой САД должна быть дополнена узлами блокировки подачи КС на позицию сборки и очистки гидросистемы ДУ по истечению срока жизнеспособности дозируемого состава.



Читайте в следующем номере:



- **Ирзаев Г.Х.** Оценка эксплуатационной и ремонтной технологичности электронных средств на этапе проектирования
- **Иванов А.А.** Применение промышленных роботов в заготовительном производстве
- **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е., Прытков С.В.** Сборка устройства Imagin Sphere™ для измерения пространственных характеристик светодиодов и светодиодных источников света
- **Шаломов В.И.** Методика обработки экспериментальных данных и оценки погрешности результатов наблюдений при испытании модели шпиндельного узла с газостатическими опорами
- **Грязев В.М., Ямников А.С.** Решение размерных цепей с точностью, нормированной по пятну контакта поверхностей

УДК 621.822.57-229.331

В.И. Шаломов, канд. техн. наук (Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: seu@knastu.ru

Особенности методики проектировочного расчета шпиндельных узлов шлифовальных станков с газостатическими частично пористыми опорами

Рассмотрены рекомендации по выбору геометрических характеристик и основные положения методики проектировочного расчета шпиндельных узлов на газостатических опорах с пористыми вставками. Приведен пример реализации методики в создании конструкции опытно-промышленного образца шпиндельного узла для внутришлифовального станка 3К-227А.

The guidelines for choosing the geometric characteristics and the main provisions of the design methodology of calculation of spindles on the gas-static bearings with porous inserts. An example of the technique in the creation of the design development of industrial design spindle assembly for Internal grinding machines 3K-227A.

Ключевые слова: методика проектировочного расчета, шпиндельный узел, газостатическая опора, испытания, опытный образец, шлифовальный станок.

Keywords: methodology of the design calculation, spindle units, gas-static bearing, test, prototype, sanding machine.

Как показали эксперименты и практика эксплуатации внутришлифовальных шпинделей, радиальные газостатические подшипники с пористыми вставками можно успешно применять в качестве опор высокоскоростных шпиндельных узлов (ШУ).

При проектировании ШУ важно правильно выбрать конструктивные размеры как собственно узла, так и газовых опор с целью получения достаточных для эффективной эксплуатации ШУ значений нагрузки и жесткости на консоли вала при заданных параметрах подводимой рабочей среды.

Проведенные исследования позволили сформулировать ряд рекомендаций по проектированию и разработать методику проектировочного расчета ШУ на газостатических подшипниках с пористыми вставками.

Методика разработана при относительном давлении наддува $\bar{p}_s = 1/6$, что соответствует стандартному давлению сжатого воздуха на машиностроительных предприятиях. Принималось также во внимание традиционное для газостатических подшипников рабочее значение относительного эксцентриситета $\varepsilon_1 \approx 0,6$. Используемые в статье обозначения геометрических параметров, характеристик ШУ соответствуют обозначениям, приведенным в публикациях [1–3].

Диаметр шпинделя D_1 относится к числу конструктивных параметров, которые задаются конструктором с учетом взаимосвязи размера газовых опор с другими элементами ШУ и с характеристиками обрабатываемого изделия. Учитывая совершенно малую разницу в диаметрах шпинделя D_1 и газового подшипника D , в практических расчетах принимают $D_1 = D$.

При назначении относительной длины передней опоры \bar{L} следует учитывать, что ее удлинение ведет к росту жесткости и нагрузки на консоли во всем диапазоне изменения числа сжимаемости (частоты вращения шпинделя).

Удлинение задней опоры практически не отражается на значениях жесткости и нагрузки и поэтому ее рекомендуют проектировать более короткой, чем передняя, исходя из соображения достижения малого угла ориентации нагрузки. При этом необходимо иметь в виду, что применение коротких подшипников с $\bar{L} < 1$ приводит к усложнению размещения вставок во вкладыше.

Увеличение удлинения передней опоры до 1,4 ведет с ростом числа сжимаемости к благоприятному повышению выходных характеристик ШУ.

Использование в высокоскоростных ШУ более длинных подшипников может привести к потере устойчивой работы вследствие заметного увеличения угла ориентации нагрузки. Кроме этого, воз-



растают технологические трудности точного изготовления длинных вкладышей. Исходя из сказанного, следует рекомендовать проектирование передней опоры с удлинением $\bar{L}_1 = 1,2 \dots 1,4$, задней опоры – $\bar{L}_2 = 1,0 \dots 1,2$.

Конструктивный параметр газостатических подшипников с пористыми вставками K_c заметно влияет на эксплуатационные характеристики ШУ.

Расчеты, выполненные при $\bar{L}_1 = 1,2$ и $\bar{L}_2 = 1,0$ с относительной раздвижкой линий наддува $\bar{d} = 0,6$ позволили сделать вывод, что без заметных отклонений от максимальных значений эксплуатационных характеристик проектирование подшипников со шпоночными вставками следует проводить при $K_c \approx 0,55$. Результаты многовариантных расчетов показали, что оптимальное значение конструктивного параметра частично пористых опор со шпоночными вставками при $\bar{L} = 1,0 \dots 1,4$ можно определить по формуле

$$K_c = 0,6 - 0,25(1,4 - \bar{L}).$$

При известном значении конструктивного параметра опор коэффициент проницаемости пористой матрицы k_p находится по соотношению [3]:

$$k_p = \frac{\delta}{12R} \left(\frac{K_c}{c} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где δ – толщина пористой вставки, м;

R – радиус подшипника, м;

c – средний радиальный зазор, м.

Как показали выполненные эксперименты и опыт создания высокоскоростных шпинделей, для обеспечения устойчивой работы подшипников с номинальным диаметром 20...60 мм необходимо ориентироваться на относительные зазоры c/D , лежащие в пределах $(1 \dots 8)10^{-4}$.

С уменьшением среднего радиального зазора абсолютная жесткость газостатических подшипников увеличивается, но при этом возрастают требования к точности изготовления шпинделя и вкладышей подшипников. Поэтому нежелательно принимать средний радиальный зазор меньше 17 мкм.

Влияние относительной раздвижки линий наддува \bar{d} газовых опор на изменение коэффициента угловой жесткости $k_{\bar{F}}$ и нагрузки на консоли шпинделя \bar{F} малозаметно. Так, при $\Lambda = 0,8$ увели-

чение \bar{d} с 0,5 до 0,7 приводит к повышению \bar{F} на 2,9 %, а коэффициента угловой жесткости на 3,3 %.

Малая чувствительность жесткости и нагрузки на шлифовальном круге к раздвижке линий наддува связана с сильным влиянием эффекта смазочного клина на положение среднего плеча элементарных сил давления. Поэтому значение относительной раздвижки линий наддува газостатических опор с шпоночными вставками можно рекомендовать в пределах $\bar{d} = 0,5 \dots 0,7$.

При выборе размеров пористых вставок газовых опор необходимо исходить из соображений обеспечения высоких эксплуатационных характеристик ШУ, устойчивого режима работы пневмощпинделя и технологичности подшипников. С этой точки зрения, как показали исследования, наиболее благоприятным является использование шести вставок шпоночной формы при их равномерном расположении в одном ряду наддува.

Относительная длина шпоночной вставки может быть определена из соотношения

$$\bar{b} + \bar{t} + 2\bar{S} = 1,$$

где \bar{b} – относительная ширина пористой вставки;

$\bar{t} = t/L$ – относительная длина вставки (t – абсолютная длина пористой вставки);

\bar{S} – относительная минимальная технологическая толщина стенки материала вкладыша, $\bar{S} = S/L$ ($\bar{S} = 0,083 \dots 0,085$).

Минимальная высота пористых вставок ограничена технологией их изготовления. Высоту вставок δ следует принимать равной толщине стенки вкладыша подшипника, имеющей достаточную прочность.

С увеличением высоты вставки растет сопротивление движению газа в пористом слое, которое вызывает частичную потерю давления в зазоре подшипника.

Выходные характеристики ШУ существенно зависят от соотношения абсолютных длины и ширины шпоночных вставок t/b . Как видно из данных, представленных в работе [2], при числе сжимаемости $\Lambda = \text{const}$ максимум нагрузки достигается при $t/b=3$ и $t/b=2$. При этом разница в значении относительной нагрузки на консоли шпинделя \bar{F} невелика.

Кроме этого, коэффициент жесткости практически не зависит от соотношения t/b . Поэтому оп-

равданным следует полагать применение шпоночных вставок, имеющих соотношение $t/b = 2$.

Увеличение раздвижки опор \bar{a} ведет к увеличению относительной нагрузки на консоли шпинделя. Однако в диапазоне $\bar{a} = 4 \dots 5$ рост \bar{F} замедляется.

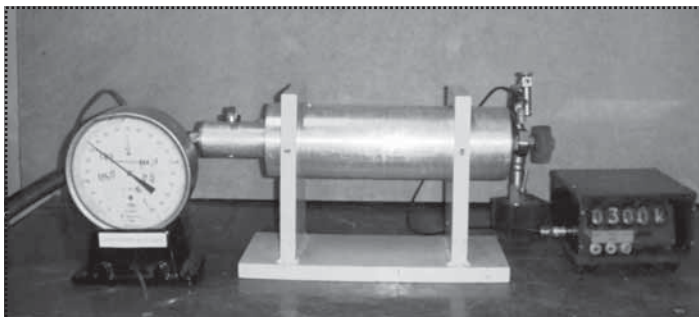
Это говорит о том, что при $a > 5$ ожидать существенного прироста нагрузки на шлифовальном круге не приходится.

Коэффициент жесткости в рабочем диапазоне числа сжимаемости при $\bar{a} = 3 \dots 5$ несколько возрастает. Выбор параметра \bar{a} – задача оптимизационная. В первом приближении можно порекомендовать принимать величину относительной раздвижки газовых опор $\bar{a} = 4$.

Уменьшение вылета шпинделя ведет к определенному росту как нагрузки на шлифовальном круге, так и жесткости. Поэтому при назначении вылета шпинделя следует исходить из соображений обеспечения его минимальной длины, достаточной для обработки внутренних поверхностей определенной группы деталей.

Таким образом, при принятом диаметре шпинделя проектировочные расчеты ШУ на газостатических подшипниках с пористыми шпоночными вставками рекомендуют проводить в следующей последовательности:

- 1) задают относительную длину газовых опор $\bar{L} = 1,0 \dots 1,4$;
- 2) определяют абсолютную длину подшипников $L_1 = D\bar{L}_1$ и $L_2 = D\bar{L}_2$;
- 3) принимают относительный радиальный зазор в пределах $c/D = (1 \dots 8) 10^{-4}$;
- 4) вычисляют абсолютный средний радиальный зазор $c = D(c/D)$;
- 5) определяют конструктивный параметр каждой газовой опоры $K_c = 0,6 - 0,25(1,4 - \bar{L})$;



Опытно-промышленный образец ШУ на газостатических опорах с пористыми вставками

6) принимают число вставок в одном ряду наддува $N_{вст} = 6$;

7) задают относительную раздвижку линий наддува $\bar{d}_1 = \bar{d}_2 = (0,5 \dots 0,7)$;

8) вычисляют абсолютное значение раздвижки линий наддува в подшипниках $d_1 = \bar{d}_1 L_1$ и $d_2 = \bar{d}_2 L_2$;

9) задают соотношение $t/b = 2$;

10) задают абсолютную длину пористой вставки t ;

11) вычисляют ширину пористой вставки $b = t/2$;

12) принимают высоту пористой вставки δ равной толщине вкладыша опоры;

13) определяют коэффициент проницаемости пористых вставок подшипника k_p для выбора пористой матрицы;

14) задают относительную величину раздвижки газовых опор $\bar{a} = 4$;

15) вычисляют абсолютное значение раздвижки газовых опор $a = \bar{a} L_1$;

16) задают относительный вылет шпинделя \bar{l} ;

17) определяют вылет шпинделя $l = \bar{l} L_1$.

Разработанная методика проектировочного расчета реализована в конструкции опытно-промышленного образца шпиндельного узла на газостатических частично пористых опорах (см. рисунок) для внутришлифовального станка ЗК-227А [4].

Испытания опытного образца внутришлифовального пневмошпинделя проведены с участием специалистов машиностроительного производства ОАО "Амурский судостроительный завод". При испытании проверяли точность внутришлифовальной обработки производственной детали. В ходе проведения испытаний ШУ отмечена безотказная работа газовых опор и пневмопривода.

Библиографический список

1. Шаломов В.И. О влиянии некоторых параметров газовых опор на выходные характеристики шпиндельных узлов шлифовальных станков // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 3. С. 32–36.
2. Шаломов В.И. Влияние удлинения бесконтактных опор на выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 10. С. 24–28.
3. Космынин А.В., Виноградов В.С. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования. Владивосток: Дальнаука, 2002. 327 с.
4. Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах / А.В. Космынин и др. М.: Издательский дом "Академия Естествознания", 2011. 178 с.

УДК 621.791.048

В.В. Карбанов, канд. техн. наук, **И.О. Бохоров**
Тел.: 8-498-520-34-72

Пайка алюминия и его сплавов

Рассмотрены паяльные материалы и технологии пайки алюминия и его сплавов, приведены особенности их применения в современном производстве алюминиевых конструкций.

Soldering materials and technologies of the soldering of aluminum and its alloys are considered, features of their application are given in modern production of aluminum designs.

Ключевые слова: алюминий, припой, флюс, силумин, пайка в печах, флюсовая пайка, вакуум, магний, пары магния, геттер, пористый титан, бесфлюсовая пайка.

Keywords: aluminum, solder, gumboil, alpac, soldering in furnaces, flux soldering, vacuum, magnesium, vapors of magnesium, heteras, porous titan, bezflyusovy soldering.

Алюминий и его сплавы находят широкое применение в различных отраслях промышленности и быту.

Из-за образования на поверхности алюминия химически и термически стойкой оксидной пленки Al_2O_3 попытки осуществить его пайку с использованием припоев и флюсов, применяемых при пайке других металлов (стали, меди), были безуспешными. Поэтому длительное время алюминий и его сплавы считались трудно паяемыми или непаяемыми металлами.

В результате глубоких исследований и длительных разработок были созданы припои, флюсы и технологии для качественной пайки алюминия, обеспечивающие высокую прочность и коррозионную стойкость паяных соединений алюминиевых сплавов.

В условиях расширения производства и номенклатуры алюминиевых конструкций пайка является одним из прогрессивных способов соединения алюминиевых элементов, обеспечивающим необходимое качество, экономичность и надежность выпускаемой продукции.

Для производства алюминиевых изделий применяют как низко-, так и высокотемпературную пайку.

Низкотемпературную пайку применяют при изготовлении ответственных изделий, при этом используют легкоплавкие припои на основе цинка, олова или их сплавов [1].

При содержании олова свыше 30 % получаемые паяные соединения обладают высокой прочностью, но недостаточной пластичностью. У них низкая коррозионная стойкость во влажной атмосфере, что обуславливает необходимость нанесения лакокрасочных, медных или никелевых покрытий.

При нанесении металлических покрытий на паяемые поверхности соединяемых деталей пайку можно проводить с использованием оловянно-свинцовых припоев (ПОС 40, ПОС 61) при нагреве с помощью паяльника.

Для улучшения технологических свойств припоев их легируют алюминием, кадмием и другими металлами.

Многие низкотемпературные припои отличаются невысокой смачиваемостью алюминиевых сплавов, что ограничивает их применение. Проблему можно решать путем введения в припой галлия, который, являясь поверхностно-активным металлом по отношению к алюминию, позволяет в значительной степени улучшить смачивающую способность припоев.

При пайке алюминиевых сплавов припоями на цинковой основе с добавками галлия получены коррозионно-стойкие высокопрочные соединения [2].

При комнатной температуре галлий не смачивает поверхность алюминия из-за наличия на ней оксидной пленки. Только при достижении температуры свыше 320 °С, когда в пленке появляются трещины, начинается процесс смачивания. При температурах свыше 450 °С начинается растекание припоя по алюминиевой поверхности и протекание



ние процесса пайки. Оптимальное количество галлия, вносимого в легкоплавкий припой, составляет 1,5 %.

При серийном производстве ответственных изделий применяют *высокотемпературную пайку* с применением среднеплавких припоев. Известно, что наиболее эффективными являются припои на основе паяемых металлов. Поэтому при высокотемпературной пайке алюминия и его сплавов применяют, в основном, припои на его основе, которые обеспечивают получение паяных соединений наиболее высокой прочности и коррозионной стойкости. Однако эти припои имеют высокую температуру плавления, близкую к температуре солидуса алюминиевых сплавов, что ограничивает их применение.

Для улучшения технологических свойств среднеплавких припоев в них вводят кремний, медь, кадмий и другие металлы [1].

Лучшей коррозионной стойкостью обладают припои системы Al–Si с содержанием кремния в пределах 4...13 %, известные, как силумины (СИЛ-0, СИЛ-1). Наиболее часто в качестве припоя применяют эвтектический силумин, содержащий 12 % кремния и имеющий температуру плавления 577 °С.

Температуру плавления припоя можно снизить путем введения в него меди. Наиболее низкую температуру плавления имеет сплав, содержащий 28 % меди, который применяется в качестве припоя под маркой 34А. Медь содержат алюминиевые припои марок П550А, П590А [3].

С увеличением температурного интервала плавления припоя его растекаемость по паяемому металлу снижается, поэтому наиболее широко применяемые припои представляют собой двойную, тройную и более сложную эвтектику. Так, припой 34А представляет собой тройную эвтектику (Al–Si–Cu). Минимальная температура плавления таких припоев, их повышенная жидкотекучесть позволяют паять изделия из любых алюминиевых сплавов, не опасаясь их пережога.

С целью улучшения и упрощения процесса пайки изделий из алюминиевых сплавов освоено производство алюминиевых лент и листов, плакированных силумином [4].

Благодаря высокой пластичности силумины легко наносятся на листы промышленных алюми-

ниевых сплавов методом прокатки. Плакированные листы можно подвергать любым способам механической обработки (штамповке, гибке, вытяжке), как обычные металлы.

Содержание кремния в силуминах составляет 6...12 %, толщина плакированного слоя – 0,3...0,5 мм.

Недостатком силуминовых припоев является высокая температура плавления – 580...600 °С. Снижения температуры плавления силумина достигаются путем легирования силумина медью или нанесением медного покрытия на поверхность плакирующего слоя термовакуумным напылением или гальваническим способом.

Алюминиевые листы и ленты применяют в качестве конструкционного материала, в частности, при производстве радиаторов и теплообменников широкого профиля. Алюминиевые сплавы обеспечивают необходимую прочность конструкции, а плакирующий слой припоя определенной толщины дает возможность соединения элементов конструкции пайкой.

Плакирование алюминиевых листов и лент осуществляют с одной или двух сторон, с гарантированной толщиной плакирующего слоя 0,3, 0,5, 1,5 и 2,5 мм.

Освоены и серийно выпускаются ленты марок АПС, АМцАС с толщиной плакирующего слоя, составляющей 6...10 % толщины ленты. В качестве плакирующего слоя любой толщины используют силумины марок СИЛ-ПС и СИЛ-2С. Такой широкий ассортимент материалов из алюминия и его сплавов, подготовленных к пайке, исключает необходимость проведения сложных подготовительных работ и расширяет область применения пайки при производстве алюминиевых конструкций.

Важное значение для получения качественных паяных соединений имеет рациональный выбор конструкционных материалов и припоя. Чаще всего при пайке применяют промышленные сплавы АМц, АМг0,5, АМг2 не упрочняемые термообработкой и допускающие повышенную температуру пайки при использовании силумина. Температура пайки термоупрочняемых сплавов АВ, АД31, АД33 не должна превышать 580 °С поскольку их температура солидуса составляет соответственно 592, 595, 585 °С, а перегрев выше этой температуры ве-



дет к пережогу и ухудшению механических свойств.

Процесс получения качественных паяных соединений затрудняется близостью температуры ликвидуса эвтектического силумина ($577\text{ }^{\circ}\text{C}$), традиционно применяемого для пайки алюминия и его сплавов.

Снижения температуры пайки достигают применением припоев с меньшей, чем у эвтектического силумина (СИЛ-1) температурой плавления. На основе системы Al–Si–Ge разработаны припой Ал-4Г и Ал-10Г, содержащие 4 и 10 % германия, и ряд других припоев с температурой плавления до $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5], при использовании которых исключается возможность перегрева указанных сплавов.

Для пайки алюминиевых сплавов в ООО "МИФИ АМЕТО" разработан и выпускается аморфно-кристаллический, быстро закаленный ленточный припой марки СТЕМЕТ 1502 толщиной $0,07\text{ мм}$. Прочность соединений, паяных этим припоем, превышает прочность соединений, паяных силумином.

Сведения о составах и свойствах припоев, применяемых при низко- и высокотемпературной пайках алюминия и его сплавов, представлены в работах [1, 3].

Качество паяных соединений алюминиевых конструкций зависит не только от выбора припоя, флюса и технологии пайки, но и от эффективности способа предварительной подготовки деталей к пайке, заключающейся в удалении жировых загрязнений и "старых" оксидных пленок. При подготовке поверхностей алюминиевых деталей к пайке применяют традиционные способы травления в щелочном растворе и в растворах кислот [3].

Щелочное травление производят обычно в $4\text{--}6\%$ -ном растворе едкого натрия, при этом происходит не только удаление жировых загрязнений и оксидных пленок с поверхности металла, но и стравливание припоя и эрозия паемого металла, что приводит к нарушению сплошности тонкостенных деталей и к образованию непропаев при пайке.

При повышении температуры раствора усиливается процесс стравливания припоя и паемого металла, что требует строгого контроля за температурой раствора.

В процессе травления, в результате протекания химических реакций, происходит естественное повышение температуры раствора, что затрудняет процесс контроля. При кислотном травлении паяемого металла температура раствора повышается в $6\text{--}7$ раз меньше.

Из-за высокой активности алюминия в процессе травления происходит загрязнение щелочного раствора алюминием и примесями, что требует ежесуточной его замены. После щелочного травления необходимо проводить осветление поверхности деталей в растворе азотной кислоты для удаления интерметаллидных фаз.

Вследствие меньшего загрязнения и уменьшения шлама кислотный раствор меняют в $5\text{--}6$ раз чаще, чем при щелочной. При кислотном травлении одновременно происходит и осветление металлов.

Кислотное травление обеспечивает лучшую смачиваемость и растекание припоя по поверхности алюминия и его сплавов, а также лучшее затекание припоев в зазоры. Паяные соединения после кислотного травления отличаются более высоким качеством и надежностью.

Приведенные способы подготовки поверхности алюминиевых сплавов – щелочное и кислотное травление – нельзя отнести к экологически чистым. Созданы универсальные кислотные и щелочные очищающие средства [6], представляющие собой водорастворимые, нетоксичные, взрыво- и пожаробезопасные, полностью разлагаемые жидкости широкого спектра применения, в составе которых присутствуют поверхностно-активные вещества и компоненты, способные удалять с поверхности жировые и оксидные пленки.

Такие средства в виде концентратов производит российская компания "ЕСТОС". Продукция компании сертифицирована и по гигиеническим показателям допущена к производству на территории России в качестве очищающих средств в промышленности и в быту.

Перед применением очистители разводят в воде до определенной концентрации. Активность растворов очистителей начинается с 10% -ной концентрации.

При использовании растворов очистителей не происходит существенного стравливания припоя и паемого металла. При повышении температуры



раствора очистителя от 20 до 50 °С сокращается время удаления с поверхности алюминия жировых загрязнений и оксидных пленок.

Время обработки в очистителе составляет около 10 мин. Качество обработки поверхности металла определяется по характеру смачиваемости водой. Щелочной очиститель является пенообразующимся.

Очистители сохраняют свою активность после обработки значительной площади. Средний расход очистителей составляет 0,05 л/м².

Прочность паяных соединений при использовании очистителей превышает прочность соединений, получаемых с использованием при травлении щелочного раствора.

Простой способ механического удаления оксидной пленки применяют при облуживании алюминиевых деталей. На поверхность детали, нагретой до температуры плавления припоя, наносят слой расплавленного припоя под которым абразивом (металлической щеткой, напильником) разрушают оксидную пленку и удаляют ее. Жидкий припой смачивает очищенную поверхность алюминия и растекается по ней. На облуженную поверхность наносят дополнительное количество припоя. Облуженные таким образом детали легко соединяются любыми способами пайки [7].

Кроме абразивного способа лужения алюминия и его сплавов широкое применение находит также и ультразвуковой способ, эффективно разрушающий оксидную пленку.

Наиболее качественное лужение алюминиевых сплавов получено при использовании латунной сетки № 018. Такая сетка обладает достаточной эластичностью и не повреждает поверхность алюминия.

Абразивное лужение внутренних поверхностей отверстий малого диаметра, а также многожильных алюминиевых проводов весьма затруднено. В этом случае применяют абразивно-кристаллический способ лужения в специальных неподвижных или вращающихся ваннах. В некоторых случаях при пайке кабелей их концы лудят затвердевающим припоем, затем вращают в расплавленном припое до полного его расплавления на кончике кабеля.

Абразивное лужение легко поддается механизации, что обеспечивает высокую производительность процесса при массовом производстве.

Горячее цинкование алюминия и его сплавов осуществляют с использованием порошков асбеста и цинка. Оцинкованные образцы легко паяются легкоплавкими оловянно-цинковыми припоями (90 % Sn, 10 % Zn).

Предел прочности паяных соединений достигает 250 МПа, в то время как при пайке неоцинкованных деталей предел прочности составляет 197 МПа. При пайке нахлесточных соединений может достигаться их равнопрочность с паяемым металлом.

Абразивное лужение особенно эффективно при пайке тонкостенных изделий. Этот способ можно использовать для лужения алюминиевой фольги толщиной 14 мкм.

Абразивную пайку легко проводить в мастерской или в домашних условиях с использованием абразивного карандаша, пресованного из порошков припоя и асбеста. Асбест, выполняющий роль абразива, легко снимает с поверхности нагретого алюминия оксидную пленку, а содержащийся в карандаше припой, расплавляясь при соприкосновении с нагретым алюминием, облуживает его поверхность [7].

Измельчение припоя и асбеста в домашних условиях можно осуществлять с использованием драчевого напильника или дрели, а при больших масштабах его производства, измельчение можно осуществить, например, на токарном станке с использованием цилиндрической фрезы диаметром 50...60 мм. Фреза закрепляется на станке в специальной оправке, один конец которой зажимается в кулачковом патроне, а второй — поддерживается центром.

Для получения стружки припоя выплавляют плитку и зажимают её в резцедержатель на суппорте станка, а суппорту сообщают поперечное движение, равное 0,07 м/мин (фреза вращается с частотой 1500 мин⁻¹).

Для получения стружки из листа асбеста нарезают полоски шириной 30 мм и длиной 120 мм. Листы складывают в пакет высотой 20...30 мм. Пакет зажимают в резцедержатель, для чего на верхнюю и нижнюю поверхность пакета накладывают метал-



лические пластинки, имеющие длину, меньшую, чем длина пакета.

Для приготовления абразивных карандашей составляют равномерную смесь порошков, состоящую из 90 % припоя (по массе) и 10 % асбеста. Смесь засыпают в пресс-форму, состоящую из втулки, стержня и основания. Диаметр стержня принимают равным 10...15 мм, а наружный диаметр втулки – 40...50 мм. Смесь прессуют при давлении 10...15 МПа. Для прессовки можно использовать гидравлический домкрат или тиски.

Перед облуживанием паяемых поверхностей деталей их нагревают до температуры, превышающей температуру плавления припоя на 20...50 °С. Процесс облуживания осуществляют путем натирания абразивным карандашом поверхности изделия до появления характерного для расплавленного припоя металлического блеска. Не следует сильно нажимать на карандаш. Движение карандаша необходимо производить с таким расчетом, чтобы абразив карандаша не оставался на облуживаемой поверхности, а удалялся за ее пределы. В противном случае его следует удалить ветошью.

Вся поверхность, подлежащая пайке, должна быть покрыта слоем припоя. Необлуженные места имеют матовый цвет, присущий оксидной пленке алюминия, хорошо видной на фоне зеркальной поверхности расплавленного припоя.

Для удобства пользования карандаш вставляют в специальную оправку, из которой он выталкивается винтом по мере расходования. Температуру облуживания можно определять по моменту плавления припоя, содержащегося в карандаше.

После облуживания абразивным карандашом на паяемые поверхности наносят дополнительное количество припоя. Детали накладывают облуженными поверхностями одна на другую, подогревают паяльной лампой до температуры, превышающей температуру плавления припоя на 30...50 °С. Если возможно, детали притирают друг к другу для получения более тонкого шва и выдавливания окислов и загрязнений на поверхность деталей, после чего соединение охлаждается.

Если притирание невозможно, высокое качество пайки может быть обеспечено легким постукиванием по месту пайки, вызывающим вибрацию деталей, способствующую сплавлению слоев припоя. Производить вибрацию следует тогда, когда

температура нагрева припоя выше температуры его плавления.

При пайке алюминиевой фольги ее концы облуживают, накладывают облуженными поверхностями внахлестку один на другой, подогревают, а затем участок нахлестки прокатывают металлическим валиком и место соединения охлаждают. При охлаждении деталей необходимо обеспечить неподвижность изделия.

При правильно выполненной пайке прочность паяного шва за счет диффузионных процессов между припоем и металлом деталей должна быть выше прочности припоя. Длина нахлестки может составлять 4–8 толщин деталей. При пайке легкоплавкими припоями целесообразно, чтобы место пайки находилось под небольшим давлением.

При испытаниях соединений, паяных представленным способом, определено, что их прочность на 20 % превышает прочность соединений, паяных ультразвуковым паяльником.

В промышленности при изготовлении ответственных изделий из алюминия и его сплавов применяют флюсовую пайку. Применяемые способы пайки предусматривают процесс удаления оксидной пленки при нагреве в период пайки, что и происходит при флюсовой пайке.

Расплав флюса должен хорошо смачивать поверхность алюминия и растекаться по ней, иметь низкую вязкость и хорошую жидкотекучесть. Флюс должен не только удалять оксидную пленку с поверхности алюминия, но и защищать поверхность изделия в процессе нагрева при пайке [8].

Флюс должен снижать поверхностное натяжение расплава припоя, способствовать его растеканию по поверхности алюминия и его затеканию в сборочные зазоры.

Расплавы флюса и припоя должны представлять собой несмешивающиеся жидкости. Плотность расплава флюса должна быть ниже плотности расплавленного припоя, что обеспечивает качественное затекание припоя в зазоры и формирование плотного паяного шва.

Чем ниже температура плавления флюса, тем ниже температура пайки.

Такое многообразие требуемых свойств флюса для пайки алюминия и его сплавов могут обеспечить не отдельные соли металлов, а многокомпонентные солевые расплавы.



Наименьшим поверхностным натяжением из расплавов галогенов обладают хлориды, поэтому их и берут за основу флюсов для высокотемпературной пайки алюминия и его сплавов. Расплавы хлоридов и их смесей имеют малый краевой угол смачивания, поэтому хорошо смачивают как чистый алюминий, так и его оксидную пленку. Хорошая смачиваемость хлоридами оксидной пленки алюминия объясняется тем, что катион алюминия взаимодействует не только с анионами кислорода оксидной пленки, но и с анионами хлора.

Однако в хлоридных расплавах расплавленный припой по поверхности алюминия не растекается и процесса пайки не происходит. Хлориды, хорошо смачивая оксидную пленку, не удаляют ее с поверхности алюминия.

Основной задачей флюса при пайке алюминия является удаление оксидной пленки путем отрыва ее от поверхности, для чего флюс должен проникнуть между пленкой и поверхностью, разрушить связи между ними, диспергировать и перевести пленку во флюс.

Введение фторидов во флюс уменьшает межфазное натяжение между алюминием и флюсом, что улучшает условия для проникновения флюса между алюминием и оксидной пленкой.

Процесс удаления оксидной пленки ускоряется вследствие ее активного растворения во фторидах. Ионы фтора вытесняют ионы кислорода из оксида алюминия с образованием на поверхности фтористого алюминия, который легко растворяется в хлоридно-фторидных флюсах с образованием комплексных соединений.

В качестве растворителей оксидной пленки алюминия можно использовать любые фториды, вносимые в хлоридные флюсы, но учитывая, что фториды щелочных металлов практически не взаимодействуют с алюминием, рекомендуют вводить фториды натрия, калия или криолит.

Это выборочное свойство фторидов было использовано немецкой фирмой "Alway" при создании флюса NOCLOK, который стали широко применять при пайке автомобильных радиаторов. Основой флюса принята эвтектика системы KF-AlF₃. Пайку радиаторов проводят в проходных печах с применением припоя.

Наибольшей активностью при удалении оксидной пленки алюминия обладают хлоридно-фто-

ридные флюсы, а наименьшей растворимостью — хлоридные флюсы, при этом наименее активны флюсы на основе эвтектики хлоридов натрия и калия.

Введение во флюс фтористого натрия и калия оправдано еще и тем, что натрий и калий являются активными компонентами по отношению к припою. Обогащение припоя этими компонентами уменьшает его поверхностное натяжение и улучшает смачиваемость, а также растекание по алюминию.

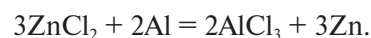
Флюсы для пайки алюминия и его сплавов представляют собой смеси хлоридных и фторидных солей.

Фториды щелочных металлов являются растворителями оксида алюминия, а низкая температура плавления флюса при пайке алюминия и его сплавов обеспечивается за счет основы флюса — хлоридов щелочных металлов.

Основой флюсов для пайки алюминия, в большинстве случаев, является легкоплавкая эвтектика LiCl–KCl с температурой плавления 352 °С. Введением в эвтектику хлористого натрия можно снизить температуру плавления до 346 °С.

Активным компонентом флюсов, как правило, служит хлористый цинк. Введение во флюс хлоридов тяжелых металлов приводит к улучшению растекаемости припоя и затеканию его в паяемый зазор.

При нагреве выше 400 °С входящие в состав флюса соли вступают в обменную реакцию с алюминием, в результате которой выделяются свободные атомы металла, например



В результате растворения алюминия во флюсе ослабляется связь имеющихся на поверхности окислов с металлом паяемого изделия, а входящие во флюс летучие составляющие (например, NH₄Cl) и пары образовавшегося при реакции соединения AlCl₃ подрывают оксидную пленку и тем самым очищают поверхность алюминия.

Одновременно с этим металлические атомы, выделяющиеся из флюса, высаживаются на чистой поверхности алюминия, покрывают ее сплошным слоем и соединяют паяемые поверхности. Подбирая состав флюса, можно получить в паяемом шве сплав (припой) с желаемыми свойствами. Добавка



во флюс фтористых соединений облегчает очистку поверхности алюминия от пленки Al_2O_3 .

При взаимодействии с расплавом флюса алюминий вытесняет из хлоридов тяжелые металлы, которые, осаждаясь на поверхность алюминия тонким жидким слоем, удаляют оксидную пленку. Расплавленный припой хорошо растекается по такой облуженной поверхности. При взаимодействии алюминия с хлористым цинком, содержащимся во флюсе, при температуре свыше $192\text{ }^\circ\text{C}$ выделяется газообразный хлористый алюминий, который способствует разрушению оксидной пленки, при этом она одновременно растворяется во фториде.

Металлический цинк, осаждаясь на поверхность алюминия, вступает с ним во взаимодействие, образуя сплав, состав которого отвечает линии ликвидуса по равновесной диаграмме состояния системы Al–Zn при температуре пайки.

В работе [1] приведены составы флюсов для высокотемпературной пайки алюминия и его сплавов на основе хлоридов щелочных металлов, используемых при пайке с различными источниками нагрева: в печах, газовым пламенем, в расплавах солей, токами высокой частоты (ТВЧ) и др.

Поверхностное натяжение хлоридов и фторидов различно. Вводя во флюс соли с различным поверхностным натяжением, можно регулировать его величину у образуемого флюса. От поверхностного натяжения зависят важнейшие свойства флюса – растекание по поверхности и затекание расплава в зазор, поверхностное натяжение на границе с припоем и газовой средой и другие свойства.

Фториды имеют большее поверхностное натяжение по сравнению с хлоридами, и их введение во флюс несколько ухудшает смачивание и растекание флюса по оксидной пленке, повышает поверхностное натяжение флюса на границе с воздухом. Это приводит лишь к незначительному увеличению времени растекания флюса по оксидной пленке, но вместе с тем уменьшает межфазное натяжение между алюминием и флюсом, что улучшает условия для проникновения флюса между алюминием и его оксидной пленкой.

Реакцию вытеснения тяжелых металлов из галогенидов во флюсах с образованием на поверхности алюминия жидкого подслоя вытесненного металла используют для проведения процесса

пайки без готового припоя, роль которого выполняет жидкий слой вытесненного металла. Процесс, при котором припой образуется в результате восстановления металла из флюса, называют реактивно-флюсовой пайкой [1], широко используемой при соединении деталей из сплавов алюминия. Пайку осуществляют без припоя, только с применением флюсов.

В состав флюсов при реактивно-флюсовой пайке обычно входят легко восстанавливаемые соединения. Образующиеся в результате реакции металлы в расплавленном состоянии служат элементами припоев, а их летучие компоненты создают защитную среду и могут также способствовать отделению оксидной пленки от поверхности металла.

В институте электросварки им. Е.О. Патона для пайки алюминиевых сплавов на основе эвтектики $KF-AlF_3$ создан реактивный флюс марки МАФ540, позволяющий проводить пайку в среде проточного нейтрального газа (азота, аргона) без использования припоя.

При пайке в контакте с алюминием происходит восстановление кремния из кремний-фторидных соединений, входящих в состав флюса, с образованием на поверхности алюминия тонкого слоя расплава, близкого по составу к эвтектике Al–Si, что существенно повышает смачивание и его растекание по поверхности алюминия. Это позволяет качественно паять тонкие и разнотолщинные изделия и без применения припоя.

С применением этого реактивного флюса обеспечивается качественная пайка алюминиевых сплавов, содержащих до 7 % магния. Прочность стыковых соединений соответствует прочности паяемого сплава.

Процесс реактивно-флюсовой пайки при использовании флюса МАФ540 протекает в следующей последовательности. При температурах $575...595\text{ }^\circ\text{C}$ происходит образование солевого расплава и затекание его в зазоры, а при $595...630\text{ }^\circ\text{C}$ происходит химическое взаимодействие расплава флюса с оксидной пленкой с ее разрушением в интервале температур $595...615\text{ }^\circ\text{C}$ на контактных поверхностях деталей происходит образование жидкого металлического расплава, заполняющего зазор.

При использовании реактивного флюса можно применять порошковый припой (силумин), что



повышает качество шва и снижает вероятность образования дефектов в паяном шве.

Для аналогичного применения разработан и другой реактивный флюс марки МАФ550 с подобными свойствами.

Самопроизвольное восстановление металлов из галогенидов при взаимодействии с алюминием термодинамически возможно для $ZnCl_2$, $PbCl_2$, $SnCl_2$, $CdCl_2$ при $177\text{ }^\circ\text{C}$, для $BiCl_2$ — при $277\text{ }^\circ\text{C}$.

С увеличением температуры возрастает степень извлечения металла из флюса. Количество выделенного металла возрастает с добавлением во флюс фтористых соединений. Особенно значительно выделение олова, свинца, кадмия и цинка. При этом олово и цинк образуют сплавы с алюминием, что приводит к увеличению объема образуемого припоя.

Реактивно-флюсовая пайка алюминиевых сплавов может проводиться с использованием любых способов нагрева.

Флюсовую пайку осуществляют различными способами: в пламени горелки, в печи, путем погружения паяемого изделия в расплав флюса или припоя. При пайке в пламени горелки к месту пайки, собранного в приспособлении изделия, прикрепляют навески припоя и наносят пастообразный флюс на органическом связующем.

Припой можно применять в виде прутка, который в процессе нагрева прижимают одним концом к офлюсованному участку места пайки.

В процессе пайки паяльщик ведет визуальное наблюдение за качеством флюсования и заполнения зазора припоем. Поэтому качество паяных соединений зависит от квалификации и мастерства исполнителя.

При пайке алюминиевых изделий применяют газо- и бензиновоздушные горелки. Ацетилено-кислородное пламя не пригодно, так как оно снижает активность флюса.

Воздушно-пропановое пламя дает медленный и равномерный нагрев и защищает окружающий металл от воздействия атмосферы. Это пламя рекомендуется применять при пайке конструкций из тонкого металла и сплавов, содержащих более 2 % магния.

Для уменьшения короблений при пайке крупногабаритных изделий их следует предварительно нагревать в печи до температуры $400\text{...}450\text{ }^\circ\text{C}$. Ме-

сто пайки нагревают горелкой или паяльной лампой до температуры пайки.

При пайке разностенных изделий для обеспечения равномерности нагрева следует больше прогревать более массивное из изделий. Пруток припоя также нагревают, вводят его в порошок флюса, а затем переносят к месту пайки. Когда зона пайки будет полностью покрыта расплавленным флюсом, вводят припой.

При толщине детали до 3 мм расплавление припоя осуществляют непосредственным нагревом прутка припоя. При больших толщинах припой плавится за счет тепла паяемого изделия.

При массовом производстве крупных и конструктивно сложных изделий пайку осуществляют в печах в контролируемой атмосфере — в осушенном воздухе или в среде очищенного инертного газа. Для пайки пригодны любые печи с электрическим или газопламенным нагревом, вмещающие паяемое изделие и обеспечивающие необходимую температуру при пайке.

Алюминиевые сплавы обычно паяют с применением силумина или припоя 34А. Применение флюса, содержащего хлористый цинк, нежелательно ввиду возможной эрозии тонкостенных деталей.

Припой размещают на участке пайки в виде отрезков прутков и засыпают порошком флюса. Нагрев производят с использованием принудительной циркуляции. Сборочное приспособление выполняют из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, коэффициент термического расширения которой близок к коэффициенту расширения алюминия. Температура пайки составляет $570\text{ }^\circ\text{C}$. При ней паяемое изделие выдерживают 5 мин.

Учитывая близость температуры пайки и плавления алюминиевых сплавов необходимо строго контролировать и управлять термическим циклом пайки. Для предотвращения растворения паяемого изделия и изменения состава припоя время пребывания изделия в печи должно быть минимальным. Сборочные зазоры должны составлять $0,1\text{...}0,2\text{ мм}$.

Пайку алюминиевых сплавов в печи осуществляют обычно в воздушной атмосфере. Использование восстановительных и инертных сред не дает лучших результатов.



Пайку проводят в большинстве случаев силумином или припоем 34А. Температуру печной пайки в воздушной среде поддерживают в пределах 550...560 °С, а при использовании эвтектического силумина — в пределах 580...600 °С. Температуру печи необходимо строго контролировать.

Качество пайки в печах зависит от степени осушенности атмосферы в печи. Чем выше степень осушенности атмосферы, тем выше жидкотекучесть припоя, тем меньше расход флюса, который может быть снижен в 6–10 раз.

Наличие контролируемой атмосферы способствует наиболее полному протеканию процесса флюсования. С целью дополнительной осушки изделия его некоторое время выдерживают при температуре 450 °С.

После пайки изделие медленно извлекают из печи и после охлаждения на воздухе до температуры затвердевания припоя, изделие отправляют на чистку от остатков флюса, которую проводят с помощью горячей и холодной воды.

В условиях массового производства пайка в печах дает возможность применять широкую механизацию процесса и обеспечить высокое качество паяных изделий.

Пайка в печах с воздушной атмосферой отличается сравнительно невысокой стоимостью оборудования, простотой сборочных приспособлений.

Наиболее эффективными и производительными способами производства паяных изделий являются способы погружения собранных изделий в ванны с расплавами флюса или припоя. При этом исключаются трудоемкие и ответственные операции по нанесению припоя и флюса на места пайки, что повышает производительность труда и исключает влияние человеческого фактора на качество паяных изделий [8].

При пайке погружением нагрев изделий осуществляется жидкими теплоносителями — расплавами припоя и флюса. Передача теплоты от теплоносителя происходит по всем контактирующим поверхностям, что обеспечивает высокую скорость и равномерность нагрева изделия. Теплоноситель одновременно выполняет роль защитной среды.

Пайка погружением является высокопроизводительным способом и эффективно применяется при массовом производстве паяных изделий. По-

гружение в расплавы флюса и припоя широко применяют при низкотемпературной и высокотемпературной пайке. При последовательном погружении изделий в ванны с расплавами флюса и припоя процесс пайки легко механизуется и автоматизируется.

При массовом производстве паяных изделий из плакированного припоем материала, имеющих множество соединений, наиболее эффективен способ пайки погружением в ванну с расплавом флюса [9].

Погружение изделий во флюсовую ванну может осуществляться как со сборочным приспособлением, так и без него, с использованием конвейерных средств.

Сборочные приспособления должны иметь минимальную массу и быть изготовлены из коррозионно-стойкой стали или высокохромистого сплава. В процессе сборки изделий припой закрепляют в местах пайки в необходимом количестве. С целью снижения массы приспособления его могут изготавливать из проволоки или из стальной сетки. Изделия на сборку должны поступать не позже, чем через 2–3 суток после травления и сушки.

Перед погружением изделие подогревают до 600 °С для удаления влаги и снижения деформации изделия.

После пайки изделие поднимают и выдерживают для стекания солей над ванной в течение 10...20 мин и после охлаждения до 100 °С промывают горячей водой (60...90 °С) для удаления остатков флюса.

Особое внимание следует уделять приготовлению солей к процессу пайки. Их изготавливают из обезвоженных и хорошо высушенных компонентов. Соли, содержащие кристаллизационную воду, сначала расплавляют, затем высушивают при температуре 100...150 °С. Остальные соли сушат по специальной технологии.

Все составы солей содержат легкоплавкую эвтектику $KCl-LiCl$, которая является основой смеси солей (флюса) и добавки различных хлористых и фтористых соединений (см. таблицу).

В расплавах хлоридных солей щелочных металлов припой не растекается по паяемым поверхностям и не затекает в зазоры. При введении в хлористый расплав добавок фторидов щелочных металлов наблюдается незначительное растекание при-

**Рабочая температура солей для ванн, выпускаемых Новосибирским заводом редких металлов и Константиновским заводом**

Состав солей, %					Рабочая температура, °С
NaCl	KCl	LiCl	KF×AlF ₃	Другие компоненты	
10,0	42,5	37,0	–	10 – NaF; 0,5 – Na ₃ AlF ₆	380
21,0	42,0	23,0	–	4–NaF; 10–LiF	538
24,0	46,0	26,0	–	4–NaF	528
–	51,0	41,0	8,0	–	560
33,0	30,0	26,0	11,0	–	610
19,0	–	–	10,0	43–CaCl ₂ ; 28–BaCl ₂	610
34,0	37,0	–	9,0	20–BaCl ₂	620

поев независимо от их концентрации в расплаве и продолжительности выдержки. Растекание припоя возрастает при введении в ванну фтористого алюминия вместо фторидов щелочных металлов, что вызвано возрастанием флюсующей активности системы.

При совместном введении в хлористый расплав добавок KF и AlF₃ его флюсующая активность зависит от концентрации образующегося в нем криолита (KF×AlF₃). Активную роль играют фтористые соли, в частности, эвтектическое соединение 3KF+AlF₃+AlF₆, состоящее из 54 % AlF₃ и 46 % KF.

Оптимальное содержание эвтектики не должно превышать 12 %. Соотношение компонентов в солевой ванне должно быть таким, чтобы расплав при температуре пайки имел высокую флюсующую активность, жидкотекучесть, низкую испаряемость и стоимость.

Объем ванны должен быть достаточно большим, чтобы при погружении изделия температура ванны не понижалась более чем на 10 °С. Масса расплава флюса в ванне может составлять от нескольких килограмм до нескольких десятков тонн. Время погружения в ванну – 1...20 мин.

С целью повышения флюсующей способности хлоридно-фторидных флюсов необходимо проводить их обезвоживание. Флюсы гигроскопичны и активно впитывают влагу. В расплавах флюсов протекают электрохимические реакции окисления

алюминия ионами гидроксида, что снижает эффективность процесса флюсования изделия.

Влага в расплавах флюсов приводит к гидролизу его компонентов.

Продолжительность процесса обезвоживания может составлять от нескольких часов до нескольких суток. Традиционно процесс обезвоживания флюсовых расплавов проводят путем погружения в них отрезков труб, листов из сплава АМц (1,2 % Mn). Вода и алюминий вступают в реакцию, в результате которой вода разлагается, образующийся водород выделяется из расплава и сгорает над ванной. Процесс обезвоживания продолжается до окончания выделения водорода и его горения [10].

Более эффективен процесс флюсования с использованием порошков с развитой поверхностью из высокоокисляющихся сплавов, в частности, сплава состава 30 % Al и 70 % Mg.

Количество вносимого материала во флюсовую ванну для обезвоживания должно составлять 0,4...0,6 % от массы расплава.

С этой же целью можно также применять сплавы, содержащие 8...15 % Mn. Температура расплава флюса при обезвоживании составляет 650 °С.

Эффект обезвоживания возрастает с повышением температуры расплава и содержания магния.



При качественном обезвоживании уменьшается унос флюса изделиями. После их флюсования повышается прочность паяных соединений.

Повышения флюсующей способности солевого расплава можно добиться путем пропускания через расплав постоянного тока, наложением на паяемое изделие положительного электрического потенциала. При этом наблюдается резкое снижение краевого угла смачивания расплавленного припоя и интенсивное его растекание в ванне даже при содержании от 3 до 0,5 % фтористого алюминия (AlF_3), что связано с увеличением концентрации ионов фтора на границах паяемой детали с флюсом и припоя с флюсом. Вследствие этого повышается скорость разрушения оксидной пленки на материалах и снижается межфазное натяжение на границе расплавленного припоя и флюса.

Наибольшая эффективность процесса пайки изделий погружением во флюсовую ванну достигается при автоматизированной системе управления процессом. Современные ванны оборудованы загрузочным устройством, работающим по автоматическому циклу: перемещение паяемых изделий, их погружение в расплав флюса, выдержка и выгрузка после пайки.

Автоматическое поддержание температуры флюсового расплава и термический цикл процесса пайки обеспечивается системой регулирования с обратной связью [9]. Ванны под расплавы припоя и флюса выпускает Новозыбковский станкостроительный завод.

Флюсовая пайка, независимо от способа ее проведения, является трудоемким и дорогостоящим технологическим процессом, связанным с большим расходом флюса и с необходимостью удаления его остатков с поверхности паяных изделий горячей и холодной водой, что приводит к загрязнению сточных вод. Возрастающие требования по охране окружающей среды привели к необходимости разработки способов безфлюсовой пайки алюминия и его сплавов.

Пайку этих металлов в восстановительных и защитных газовых средах не проводят из-за трудности удаления прочной, плотной и химически стойкой оксидной пленки. Она не разлагается в вакууме, практически достигаемом в современных печах, не растворяется в паяемом металле, не устраняется даже такими активными газовыми средами,

как водород и трехфтористый бор, применяемыми при пайке других металлов и сплавов. Газовые среды позволяют лишь ограничить количество применяемого флюса и несколько улучшить условия для флюсования изделия. Вместе с тем термическая дегазация материалов камеры, использование изделий и приспособлений в процессе пайки создают дополнительные трудности для проведения процесса пайки.

В последнее время широкое развитие получили способы бесфлюсовой пайки алюминия и его сплавов в высоком и низком вакууме. Пайку изделий из алюминиевых сплавов проводят в вакуумной печи с разрежением $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па с применением припоев системы Al–Mg, при температуре 500...620 °C с выдержкой до 15 мин. Охлаждение производят путем ввода в рабочую камеру вакуумной печи воздуха или сушеного азота под давлением 10^{-4} МПа [11].

Несмотря на высокую степень разрежения, в атмосфере вакуумной камеры остаются остатки кислорода и паров воды, которые вызывают повторное окисление алюминия. При этом в процессе пайки парциальное давление газовых компонентов и общее давление в камере постоянно изменяются. Это приводит к необходимости ввода в вакуумную камеру вещества, вступающего во взаимодействие с кислородом и парами воды. Определено, что такими свойствами обладают магний и титан. Широкое применение при пайке нашел магний, имеющий высокое давление паров и низкую стоимость.

Определено, что магний обладает более высоким сродством к кислороду, чем алюминий, и поэтому способен восстанавливать его из оксидов, и имея высокую упругость паров, может являться хорошим геттером по отношению к кислороду и другим соединениям. Оксидная пленка магния имеет низкие защитные свойства и не препятствует контактному взаимодействию припоя с основным металлом.

Механизм разрушения и удаления оксидной пленки при бесфлюсовой пайке алюминиевых сплавов в вакууме в присутствии магния происходит следующим образом. При нагреве в процессе пайки происходит интенсивное испарение магния, пары которого энергично связывают кислород в рабочем пространстве печи. Образующиеся

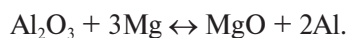


оксиды магния постепенно удаляют вакуумным насосом.

С уменьшением содержания кислорода и увеличением парциального давления паров магния создаются условия для восстановления алюминия из его оксидов парами магния. На поверхности алюминия образуется рыхлый слой оксида алюминия, обеспечивающий доступ парам магния к поверхности алюминия. Происходит адсорбция паров магния с образованием легкоплавкой жидкой фазы, которая растекаясь под оксидной пленкой, разрушает ее. В момент плавления припой, растекаясь по поверхности металла, образует паяное соединение.

С использованием магния разработан эффективный способ бесфлюсовой пайки алюминия в высоком вакууме в присутствии паров магния [12].

В основе этого способа пайки лежит способность магния вступать в металлотермическую реакцию с оксидной пленкой с восстановлением алюминия:



Пары магния, образующиеся в вакууме, и расплавленный припой, проникая под поверхность алюминия через трещины в оксидной пленке, образовавшейся при нагреве, приводят к контактно-твердо-газовому и твердо-жидкому плавлению паяемого металла под оксидной пленкой, что способствует ее диспергации.

Для смачивания алюминия припоем и последующего его растекания достаточно появления локальных нарушений в оксидной пленке, которая не восстанавливается, поскольку пары магния, взаимодействуя с кислородом и парами воды, снижают их парциальное давление непосредственно в зоне реакции.

Эффект разрушения оксидной пленки возрастает если магний введен в основной металл или припой.

Пайку в высоком вакууме (10^{-3} Па) в присутствии паров магния широко используют при изготовлении теплообменников.

Недостатком способа бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов в высоком вакууме в присутствии паров магния является необходимость перио-

дической очистки камеры, нагревательных элементов и вакуумной системы от сконденсировавшихся паров магния и его оксидов, что предусматривает демонтаж печи.

Успешно применяют пайку в специальном контейнере, представляющем собой тонкостенную оболочку из стали или титана коробчатого типа, на внутренней поверхности которого расположены навески магния. Собранный изделие устанавливают в контейнер, помещают в рабочее пространство вакуумной печи и осуществляют пайку [13].

Этот способ обеспечивает равномерность нагрева изделия и минимальный объем вакуума вокруг изделия, уменьшает загрязнение вакуумной печи.

Одним из вариантов вакуумной технологии пайки является способ, позволяющий вести процесс при нагреве в низком вакууме с остаточным давлением менее 10 Па с использованием в качестве припоя силумина. Переход к низкому вакууму стал возможен благодаря применению вспомогательного контейнера с затвором, уплотненным титановой губкой с введением паров магния из навески, которая размещена в затворе под губкой, выполняющей функцию неиспаряемого геттера. Этот способ позволяет осуществлять пайку на более простом оборудовании и перспективен при изготовлении крупных изделий.

В ОАО "Криогенмаш" разработан способ бесфлюсовой пайки крупных алюминиевых конструкций с применением силумина, не содержащего магний, в аргоне, очищенном от кислорода и паров воды. В процессе пайки обеспечивалась дополнительная очистка атмосферы камеры путем размещения в камере пластин пористого титана, выполняющего функцию геттера, который по сравнению с титановой губкой более технологичен и позволяет осуществлять пайку в практически безокислительной атмосфере.

В процессе пайки производится многократное вакуумирование камеры с целью дегазации изделия и геттера в процессе нагрева.

Простым и эффективным способом бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов высокотемпературными припоями является пайка в среде нейтрального газа (аргона) с предварительным лужением паяемых поверхностей деталей легкоплавким припоем, обладающим меньшим химическим



сродством с паяемым металлом, чем высокотемпературный припой. Предварительное лужение предохраняет паяемые поверхности от окисления в процессе пайки и при хранении.

В качестве легкоплавких припоев применяют олово и припои на его основе, например В200А, П250А, ПОС 61, которые наносят на паяемые поверхности абразивным способом, слоем толщиной 0,001...0,004 мм. Из высокотемпературных припоев используют припои на алюминиевой основе – силумины.

При капиллярной пайке расплав высокотемпературного припоя затекает в зазор, вытесняя из него легкоплавкий припой, и формирует высокопрочное и коррозионно-стойкое паяное соединение.

Такой способ пайки может проводиться и на воздухе при быстром нагреве (с использованием токов высокой частоты (ТВЧ)) и активного припоя 34А.

Бесфлюсовую высокотемпературную пайку алюминия и его сплавов можно осуществлять в вакууме или защитной газовой среде контактно-реактивной пайкой без использования готового припоя. Жидкая фаза, выполняющая роль припоя, образуется в месте контакта соединяемых металлов при нагреве до температуры контактно-реактивного плавления [14].

На одну из соединяемых поверхностей методом термовакуумного напыления или гальваническим способом наносят медное покрытие или покрытие из медного сплава (95 % меди) толщиной 3...13 мкм. Детали прижимают друг к другу и место соединения нагревают до температуры 540 °С в защитной атмосфере при невысоком вакууме. При пайке микронеровности на соединяемых поверхностях разрушают оксидную пленку и обеспечивают контакт алюминия с медью.

Жидкая фаза, образующаяся в месте контакта металлов при нагреве до температуры контактно-реактивного плавления, играет роль припоя. Процесс диспергирования оксидных пленок, протекающий при контактно-реактивной пайке алюминиевых сплавов, также происходит и при пайке сплавов, содержащих значительное количество магния (АМг3, АМг6). Время выдержки при температуре пайки составляет до 30 мин.

Детали из алюминиевых сплавов могут быть спаяны через прокладку меди и медных сплавов, содержащих более 50 % меди, таких как бронзы и латуни, не содержащие элементов, существенно изменяющих температуру плавления образующейся эвтектики. Толщина рекомендуемой прокладки составляет 26...60 мкм при пайке деталей толщиной 3 мм. При этом оптимальное давление на детали – 7 МПа.

Возможна бесфлюсовая контактно-реактивная пайка алюминиевых сплавов типа АМц, АМг6 в невысоком вакууме с применением припоя эвтектического силумина в виде фольги или плакированного слоя толщиной 15 мкм с нанесением медного покрытия на припой или паяемую поверхность алюминиевого сплава. Температура пайки указанных сплавов составляет 545...585 °С и 555...595 °С соответственно, что на 100...150 °С ниже, чем при пайке с прослойкой меди (630...645 °С). Соединения обладают высокой прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью [15].

Длительность процесса контактно-реактивной пайки определяется временем, необходимым для образования на поверхности контактируемых металлов легкоплавких твердых растворов вследствие диффузионных процессов или прослоек фаз, образующих эвтектику. После появления жидкой фазы скорость плавления возрастает по экспоненциальному закону.

В НПО "Техмаш" (Москва) разработана технология контактно-реактивной пайки телескопических соединений трубопроводов из алюминиево-магниевого сплава АМг3 и АМг6 в монтажных условиях.

На соединяемые поверхности трубок гальваническим способом наносится слой меди толщиной 10...15 мкм, после чего трубки стыкуются с образованием телескопического соединения. Наружная трубка обжимается до образования плотного контакта соединяемых поверхностей. Допустимый сборочный зазор составляет 0,08...0,12 мм. На собранный узел устанавливается радиационный нагреватель и разъемная камера, заполняемая аргоном для защиты от воздействия атмосферы паяемого узла и нагревателя. Аргон заполняет также внутреннюю полость паяемых трубок.



При температуре 507 °С между контактируемыми трубками образуется жидкая фаза эвтектического состава (Al 63 %, Mg 6 %, Cu 31 %), выполняющая роль припоя. Время нагрева и пайки составляет 80 с.

Прочность соединений трубопроводов соответствует прочности металла труб. Паяные соединения герметичны и коррозионно-стойки в агрессивных средах. Разработанная технология расширяет возможности пайки при монтаже трубопроводных систем современной техники.

Библиографический список

1. **Справочник по пайке** / Под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003.
2. **Хлудов А.А., Каракозов Э.С., Смирнов Г.И.** Пайка алюминия и его сплавов низкотемпературными припоями, легированных галлием // Сварочное производство. 1986. № 9. С. 31–33.
3. **Никитинский А.М.** Пайка алюминия и его сплавов. М.: Машиностроение, 1983.
4. **Лукашин М.Д.** Производство листов, лент алюминиевых сплавов, плакированных припоями на основе силумина // Пайка алюминиевых конструкций. М.: МДНТП, 1990.
5. **Степанов В.В.** Разработка припоев системы Al–Si–Ge для повышения прочности паяных конструкций алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006.
6. **Новая** экологически чистая технология подготовки поверхности алюминиевых сплавов к пайке / Е.И. Сторчай и др. // Сварочное производство. 2001. № 1. С. 21–28.
7. **Лашко С.В., Лашко Н.Ф.** Пайка алюминиевых сплавов. М.: МДНТП, 1958.
8. **Сторчай Е.И.** Флюсовая пайка алюминия. М.: Metallurgia, 1980.
9. **Гржимальский Л.Л., Ильевский И.И.** Технология и оборудование пайки. М.: Машиностроение, 1979.
10. **Смирнов Г.Н.** Прогрессивные способы пайки алюминия. М.: Metallurgia, 1981.
11. **Сторчай Е.И., Горбатский Ю.В., Лантушенко Л.С.** Некоторые аспекты технологии высокотемпературной пайки алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2009. № 9. С. 43–49.
12. **Суслов А.А.** Бесфлюсовая пайка узлов из алюминиевых сплавов в вакууме // Сварочное производство. 1994. № 10. С. 23–25.
13. **Сторчай Е.И., Лантушенко Л.С.** Экологически чистая технология бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2007. № 12. С. 22–23.
14. **Лашко С.В., Лашко Н.Ф.** Контактно-реактивная пайка // Сварочное производство. 1969. № 11. С. 34–37.
15. **Лашко С.В., Сукачева Г.Н.** Пути применения контактно-реактивного плавления металлов // сб. докл. "Пайка материалов в машиностроении". Рига, 1968.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;

редакции журнала: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42;

тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.

Технический редактор *Жиркина С.А.*

Корректоры *Сажина Л.И., Соношкина Л.Е.*

Сдано в набор 15.05.13 г. Подписано в печать 24.06.13 г. Формат 60×88 1/8.

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

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".

Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.