

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

# 12 <sup>2012</sup> (149)

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Сборочное оборудование и его элементы*

**Антонец И.В., Терешенок А.П.** Динамометрические системы с демпфирующими устройствами . . . . . 3

### *Современные технологии сборки*

**Медарь А.В.** Инновационные технологии сборочного производства изделий специального машиностроения . . . . . 7  
**Корчак Е.С.** Обеспечение быстрого и эффективного монтажа станин гидравлических прессов колонного типа . . . . . 10

### *Технологическая оснастка для сборки*

**Иванов А.А.** Координатная система точного позиционирования объекта в нанометрическом диапазоне . . . . . 13

### *Обеспечение качества. Испытания. Контроль*

**Гоцеридзе Р.М., Румянцев С.В.** Применение балансировочного станка с магниторезонансным подвесом для измерения параметров уравновешенности поплавковых чувствительных элементов . . . . . 17  
**Челпанов И.Б., Кочетков А.В.** Методы и средства создания нагружения и измерения параметров нагружения при испытаниях . . . . . 22  
**Фомин А.А.** Обеспечение микрогеометрии поверхностей при обработке заготовок с неоднородными свойствами . . . . . 27

### *Сборочно-сварочные работы. Пайка*

**Микаева С.А., Петренко Ю.П., Микаева А.С., Железникова О.Е., Сеницына Л.В.** Металлокерамический припой . . . . . 30  
**Карабанов В.В., Бохоров И.О.** Пайка высоколегированных сталей и сплавов . . 32

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

### **Редакционный совет**

**МОСКВА**  
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор)  
А.А. ГУСЕВ  
М.В. ВАРТАНОВ  
А.М. ДАЛЬСКИЙ  
И.Н. ЗИНИНА  
Ю.Л. ИВАНОВ  
Ю.Г. КОЗЫРЕВ

А.И. КУМЕНКО  
А.В. МЕДАРЬ  
Е.А. МИКРИН  
В.В. ПОРОШИН  
Б.В. ШАНДРОВ  
А.А. ШАТИЛОВ  
А.Г. ХОЛОДКОВА  
Г.А. ЯРКОВ

### **Региональные редсоветы**

**БЕЛГОРОД**  
Н.А. ПЕЛИПЕНКО

**БРЯНСК**  
О.А. ГОРЛЕНКО

**ВЛАДИВОСТОК**  
Ю.Н. КУЛЬЧИН  
А.А. СУПОНЯ  
В.М. КОРНИЕНКО

**ВОЛГОГРАД**  
В.Г. КАРАБАНЬ  
М.Г. КРИСТАЛЬ  
В.И. ЛЫСАК  
В.М. ТРУХАНОВ

**ИЖЕВСК**  
И.В. АБРАМОВ  
Б.А. ЯКИМОВИЧ  
В.Г. ОСЕТРОВ

**КАЗАНЬ**  
Р.И. АДГАМОВ

**КОВРОВ**  
Ю.З. ЖИТНИКОВ

**КОЛОМНА**  
Ю.Д. АМИРОВ

**КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ**  
Б.Н. МАРЬИН  
В.И. ШПОРТ  
А.М. ШПИЛЕВ

**НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ**  
С.В. ДМИТРИЕВ  
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ

**НИЖНИЙ НОВГОРОД**  
С.В. ГОЛУБЕВ

**ОМСК**  
В.Н. КОСТЮКОВ

**ОРЕЛ**  
Ю.С. СТЕПАНОВ

**БЕЛГОРОД**  
Г.А. ХАРЛАМОВ

**ОРЕНБУРГ**  
А.Н. ПОЛЯКОВ  
А.И. СЕРДЮК  
А.П. ФОТ

**РЫБИНСК**  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ  
В.В. НЕПОМИЛУЕВ  
А.Н. СЕМЕНОВ

**САМАРА**  
М.А. ЕВДОКИМОВ  
Ю.А. ВАШУКОВ  
Г.А. КУЛАКОВ  
В.А. НИКОЛАЕВ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
В.Ф. КУЗЬМИН  
Е.В. ШАЛОБАЕВ

**ТОЛЬЯТТИ**  
А.И. РЫЖКОВ

**ТУЛА**  
В.В. ПРЕЙС

**ХАБАРОВСК**  
В.А. ЛАШКО

**Украина**

**КИЕВ**  
А.С. ЗЕНКИН  
В.А. МАТВИЕНКО

**ДОНЕЦК**  
А.Н. МИХАЙЛОВ

**СЕВАСТОПОЛЬ**  
Е.Л. ПЕРВУХИНА

**Беларусь**

**МИНСК**  
В.Л. БАСИНЮК  
М.Л. ХЕЙФЕЦ

**ГОМЕЛЬ**  
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ

### **Ответственные за подготовку и выпуск номера:**

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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.

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

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

12 <sup>2012</sup>  
(149)

### CONTENTS

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

**Antonets I.V., Tereshenok A.P.** Dynamometric weighing systems with damping devices . . . . . 3

#### *Modern technologies in assembly*

**Medar A.V.** Innovations techniques assembly manufacture production especial machine building . . . . . 7

**Korchak E.S.** Providing speedy and effective assembling of hydraulic press frames of columnar type . . . . . 10

#### *Technological equipment for assembly*

**Ivanov A.A.** The coordinate system of precise positioning of the object in nanometric range . . . . . 13

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

**Gotseridse R.M., Rumiantsev S.V.** Magnetic-resonance suspension of balancing tool with controlled sensitivity and hardness . . . . . 17

**Chelpanov I.B., Kochetkov A.V.** Methods and means of creation of loading and measurement of parameters of loadings at tests are considered . . . . . 22

**Fomin A.A.** Surfaces microgeometry maintenance at processing of slabs with non-uniform properties . . . . . 27

#### *Assembly welding works. Soldering*

**Mikaeva S.A., Petrenko Yu.P., Mikaeva A.S., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V.** The cermet solder . . . . . 30

**Karabanov V.V., Bohorov I.O.** The soldering high-alloyed staly and alloys . . . . . 32

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

#### **Editors**

##### **MOSCOW**

A.S. VASIL'EV  
(Chief editor)  
M.V. VARTANOV  
A.M. DALSKY  
A.A. GUSEV  
I.N. ZININA  
Yu.L. IVANOV  
Yu.G. KOZYREV

A.I. KUMENKO  
A.V. MEDAR'  
E.A. MIKRIN  
V.V. POROSHIN  
B.V. SHANDROV  
A.A. SHATILOV  
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. OSETRV

##### **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. SHALOBAEV

##### **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

#### **Executive editors of current issue:**

Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

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.

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

УДК 624.869.72-5

**И.В. Антонец**, *д-р техн. наук*, **А.П. Терешенок**, *аспирант*  
(Ульяновский государственный технический университет)  
E-mail: Tweed.di@gmail.com

## Динамометрические системы с демпфирующими устройствами

*Представлены оригинальные конструкции систем кольцевых упругих чувствительных элементов, используемых в силоизмерительных устройствах, с применением различных демпфирующих элементов. Приведены результаты экспериментальной оценки влияния демпфирующих элементов на время затухания колебательных процессов в реальных силоизмерительных приборах при воздействии ударной нагрузки.*

*Presents the design of the original systems of ring elastic sensing elements used in the force uring devices with damping elements. Presented results of the experimental researches show the influence of damping elements on the decay time of the oscillatory processes in a real force measuring devices when exposed to shock loads.*

**Ключевые слова:** упругий элемент, кольцевой упругий элемент, кольцевой элемент, чувствительный элемент, деформация упругого элемента, демпфирующие устройства.

**Keywords:** elastic element, ring elastic element, ring element, sensitive element, deformation of the elastic element, damping devices.

Особенностью силоизмерительных приборов с упругими преобразователями является зависимость их точности от упругих "несовершенств" материала, из которого этот преобразователь изготовлен: прямого и обратного упругого последействия, гистерезиса, релаксации напряжений и др. К упругим чувствительным элементам (УЧЭ), применяемым для измерения силы, предъявляют дополнительные повышенные требования стабильности и постоянства показаний. Минимального влияния несовершенств в измерительных УЧЭ достигают путем соответствующего выбора материала, конструкции и технологии их производства (защитные покрытия, термообработка, тренировка и др.).

При воздействии силы  $G$ , вне зависимости от времени, получаем функцию преобразования УЧЭ (ФП)

или его упругую характеристику, которая, будучи линейной, представима в виде зависимости

$$\delta_{ст} = S G, \quad (1)$$

где  $\delta_{ст}$  – деформация УЧЭ, мм;

$S$  – чувствительность УЧЭ, мм/Н;

$G$  – сила, Н.

Чувствительность  $S$  является основной характеристикой УЧЭ, которая выражает величину нагрузки, необходимую для перемещения его характерных точек, относительно которых измеряют деформацию. Важно отметить, что чувствительность УЧЭ относительно различных характерных точек будет различна.

Упругие элементы, работающие под воздействием динамических нагрузок, рассчитывают [2] с учетом не только статических, но и динамических показателей, среди которых можно выделить наиболее значимые: быстродействие  $N$  – максимально обеспечиваемое УЧЭ число измерений с заданной погрешностью, а также коэффициент приведения массы  $K_m$ , показывающий влияние присоединенной к УЧЭ массы на его характеристики.

Быстродействие прибора в целом непосредственно зависит от частот собственных колебаний УЧЭ. Упругое тело, коим является УЧЭ, рассматриваемое как материальный континуум, имеет бесчисленное множество степеней свободы: каждая точка из бесчисленного множества материальных точек имеет три степени свободы, а взаимодействие ее с другими точками образует упругие связи. Поэтому упругое тело обладает бесчисленным множеством собственных частот, соответствующих бесчисленному множеству нормальных колебаний. Кроме того, при использовании динамометра в качестве весов для измерения массы тела эта масса также непосредственно оказывает влияние на значенные частот собственных колебаний системы.

Несущая система силоизмерения образуется деталями, соединенными между собой затянутыми и незатянутыми (подвижными) стыками. В стыке и материале деталей происходит рассеяние энергии, за счет чего в систему вносится демпфирование. Возбуждение колебаний в системе осуществляется, как правило, за счет внешних сил и вибраций, возникающих при экс-



плутации устройства. Суммарное колебательное перемещение осуществляется за счет пространственных деформаций деталей и их стыков. Соотношение этих деформаций определяется динамическими параметрами системы (жесткостями, массами, демпфированием) и меняется в зависимости от частоты возбуждения. Вариация этих соотношений в принципе возможна лишь при введении в конструкцию системы дополнительных демпферов.

Для определения динамических характеристик УЧЭ при заданных условиях эксплуатации представляет интерес отыскание только низших частот собственных колебаний, которые непосредственно определяют время успокоения УЧЭ вследствие нагружения, а также служат для оценки возможности появления резонанса в процессе эксплуатации. Кроме того, быстродействие зависит от коэффициента демпфирования материала (коэффициента внутреннего трения), из которого изготовлен УЧЭ.

В общем случае, согласно работе [5] выражение быстродействия принимает вид:

$$N = \frac{1}{t_{\text{усп}}} = \frac{2 \pi f_0 \beta}{\ln \gamma \sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{усп}}$  – время успокоения;

$f_0$  – низшая частота собственных колебаний УЧЭ, Гц;

$\beta$  – степень успокоения;

$\gamma$  – заданная относительная амплитудная погрешность, выраженная в долях.

Амплитудная погрешность может быть представлена следующим образом [4]:

$$\gamma = (2\beta^2 - 1) \frac{f}{f_0}, \quad (3)$$

где  $f$  – эксплуатационная частота вынужденных колебаний УЧЭ, Гц.

Степень успокоения в свою очередь определяется зависимостью

$$\beta = \frac{\xi}{2 m f_0}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент демпфирования материала (коэффициент внутреннего трения);

$m$  – совокупная колебательная масса элемента и подвешенного к нему груза, кг.

Нетрудно заметить, что представленные зависимости (2)–(4) являются функциями рабочего диапазона частот (или предела измерения с учетом интенсивности нагружения). Таким образом, быстродействие УЧЭ безотносительно условий эксплуатации полностью характеризуется коэффициентом демпфиро-

вания  $\xi$  и низшей частотой собственных колебаний УЧЭ  $f_0$ . Следовательно, характеризуя быстродействие УЧЭ, имеет смысл говорить только об этих двух характеристиках.

В силу того, что система УЧЭ–груз представляет собой единую колебательную систему, влияние массы груза необходимо учесть, так как по мере изменения массы будут изменяться значения собственных частот колебаний. В силу того, что это влияние определяется только конструктивными параметрами УЧЭ, разумно было бы выделить его в отдельную характеристику – коэффициент приведения массы  $K_m$ .

Влияние коэффициента приведения массы на каждую из собственных частот колебаний определяется в соответствии с работой [6] выражением

$$f_0 = f_{0_{\text{УЧЭ}}} \sqrt{\frac{K_m}{\alpha + K_m}}, \quad (5)$$

где  $f_{0_{\text{УЧЭ}}}$  – собственная частота колебаний УЧЭ без учета массы груза, Гц;

$\alpha$  – отношение массы груза к собственной массе УЧЭ.

Частота собственных колебаний УЧЭ в виде кольца без учета массы груза, согласно работе [6], может быть рассчитана как

$$f_{0_{\text{УЧЭ}}} = \frac{0,964 h}{R_0} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6)$$

где  $h$  – толщина УЧЭ, мм;

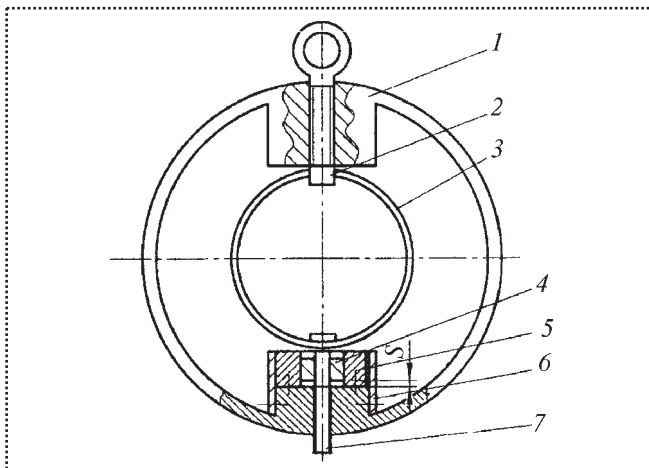
$R_0$  – средний радиус УЧЭ, мм;

$E$  – модуль упругости первого рода, Па;

$\rho$  – плотность материала УЧЭ, кг/м<sup>3</sup>.

Зависимость (6) получена в соответствии с классической теорией колебаний при допущении, что кольцо имеет постоянное сечение, равномерно распределенную массу и его форма разбита двумя узлами на четыре элемента, совершающих упругие колебания.

Приведенные рассуждения легли в основу анализа и синтеза весоизмерительных устройств, использующих в качестве упругого преобразователя систему УЧЭ. Существующие силоизмерительные устройства, чувствительным элементом которых является упругое кольцо, работают в определенных интервалах нагрузки. Характерной особенностью известных силоизмерительных устройств является наличие порога чувствительности, не позволяющего осуществлять измерение малых сил с заданной точностью. Известны оригинальные конструкции силоизмерительных устройств [1], у которых пара колец работает или последовательно, или параллельно, что обеспечивает заданную точность измерения нагрузки в широком диапазоне ее из-



**Силоизмерительное устройство с системой упругих колец, соединенных воздушным демпфером:**

1 – внешнее кольцо; 2 – болт; 3 – внутреннее кольцо; 4 – плунжер; 5 – гильза; 6 – пружины; 7 – шток

менения, а также повышает быстродействие прибора в целом.

Проведенные исследования значений низших частот колебаний для различных по конфигурации УЧЭ, а также интервалов затухания колебательного процесса при ударном воздействии нагрузки позволили авторам разработать ряд конструкций силоизмерительных устройств, использующих схему с параллельной работой упругих колец, но соединенных между собой с помощью демпфирующих устройств.

Использование демпфера предположительно уменьшит скачок статической характеристики в момент начала работы двух колец. Более того, использование демпфера позволит погасить собственные колебания упругой системы и улучшить ее частотную характеристику, особенно для кольца с большей чувствительностью.

Представленное на рисунке силоизмерительное устройство состоит из внешнего кольца 1 и внутреннего кольца 3, прикрепленного к верхней части внешнего кольца. Снизу к кольцу 3 прикреплен шток 7, который с минимальным зазором перемещается в гильзе 5, движения которой в свою очередь ограничивают по двум координатам пружины 6. Между нижним основанием плунжера и нижним приливом внешнего кольца присутствует зазор  $S$ , т.е. используется конструкция поршневого воздушного демпфера с плоским поршнем.

Для данной работы было также изготовлено устройство с вогнутой контактной поверхностью поршня, имеющего форму диска с выточкой в его нижней части.

Устройство работает следующим образом. В процессе воздействия на силоизмерительное устройство нагрузки в работу вступает внутреннее кольцо 3. При

достижении пороговой нагрузки плунжер 4, сжимая воздух, перемещается и ложится на основание внешнего кольца 1, ликвидируя тем самым зазор  $S$ . Нагрузку начинают воспринимать оба кольца, работая параллельно до предельной нагрузки. Помимо функции демпфирования конструкция выполняет функцию центрирования перемещения штока 7, что позволяет избежать скачкообразного процесса деформации системы колец. При радиальном ударе гильза 5 смещается в сторону, растягивая кольцевую пружину 6, которая, в свою очередь, возвращает систему в исходное положение.

На основе конструкции, показанной на рисунке, авторами статьи были разработаны динамометрические устройства с жидкостным демпфером. Основное отличие заключалось в том, что гильза 5 была наполнена жидкостью, а каналы для циркуляции жидкости выполнялись либо в самом плунжере 4, либо в гильзе 5.

Наличие жидкостного демпфера компенсирует скачки перемещения при переходе от работы внутреннего кольца к совместной работе с внешним. Достижимый эффект демпфирования последних конструкций – максимальный. К недостаткам можно отнести необходимость герметизации гильзы, а также относительную сложность технологического процесса изготовления каналов в случае их расположения в гильзе.

Для экспериментальной оценки характеристик демпфирования систем был разработан стенд для измерения времени затухания колебательных процессов, возникающих при нагружении системы кольцевых УЧЭ, включающий измерительное устройство (вторичный датчик), усилитель и аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Кольцевые УЧЭ были изготовлены из материала сталь 40Х. В соответствии с технологическим процессом кольца были подвергнуты закалке, отпуску, циклической и статической "тренировке". Размеры УЧЭ, составляющих систему, представлены в таблице.

Для нагружения систем кольцевых УЧЭ использовался груз массой 30,5 кг, свободно падающий с высоты 100 мм на чашу измерительного устройства. В целях исключения влияния на колебания системы в це-

**Геометрические параметры УЧЭ**

| Расположение УЧЭ | Средний радиус $R$ , мм | Толщина $h$ , мм | Высота $b$ , мм | Конструктивный угол прилива $\alpha$ |
|------------------|-------------------------|------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Внутреннее       | 41,4                    | 2,0              | 14,0            | 90°                                  |
| Внешнее          | 62,0                    | 2,0              | 16,0            | 66°56'                               |



лом упругого взаимодействия груза с чашей, был использован насыпной груз, плотно упакованный в матерчатую емкость.

Эксперимент проводили при четырех параллельных измерениях. Для обработки экспериментальных данных были использованы программы GoldWave v4.24 GoldWave Inc., "Узкополосный спектральный анализ" ZetLab, в которых были проведены частотный анализ и фильтрация шума, а также произведено графическое представление полученных результатов. Время затухания переходного процесса определялось с амплитудной погрешностью 2 %.

Полученный в результате анализа ряд времен затухания колебаний системы позволяет оценить эффективность демпфирования разработанных устройств. Так, для конструкции динамометрического устройства без демпфирующих элементов время успокоения составило 1,731 с, для конструкции с воздушным демпфером – 1,501 с, и для конструкции с жидкостным демпфером – 0,895 с. Влияние различия в форме контактной поверхности плунжера воздушного демпфера, а также в месте расположения каналов циркуляции жидкостного демпфера на результаты эксперимента оказалось в пределах погрешности измерения.

Очевидна наибольшая эффективность демпфирующих устройств. В то же время требуемая эффективность демпфирования определяется конструкцией и режимом работы грузозачного устройства. Следовательно, реализована может быть любая из приведенных конструкций с учетом сложности изготовления и надежности эксплуатации.

## Вывод

*В результате проведенных исследований авторами разработаны оригинальные конструкции силоизмерительных устройств с параллельной работой измерительных колец, соединенных между собой с помощью демпфирующих устройств. Предлагаемые конструкции предназначены для измерения сил в диапазоне от десятков до сотен ньютонов с равной чувствительностью во всем диапазоне и в широком диапазоне частот возмущающих воздействий.*

## Библиографический список

1. Антоненко И.В., Табаков В.П., Финогенов Д.Э. Весоизмерительные устройства с кольцевым упругим элементом и вторичным фотодатчиком // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2006. № 12. С. 21–25.
2. Антоненко И.В., Демокритова А.В. Динамические модели силоизмерительных устройств кольцевого типа // Труды 2-й междунаро. конф. "Математическое моделирование систем и процессов". Ульяновск: УлГУ, 1999. С. 43–45.
3. Джилалов И.Э. Динамика электромеханического преобразования с силовым уравниванием и электронным демпфированием // Датчики и системы. 2008. № 11. С. 9–12.
4. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
5. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 147 с.
6. Аманьев Л.В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. М.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1964. 418 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

## СПРАВОЧНИК ФРЕЗЕРОВЩИКА

Л.Н. Бердников, В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов и др.

Под ред. В.Ф. Безъязычного

Объем 272 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-524-9 Цена 440 р.



Изложены основные сведения о процессе фрезерования, фрезерных станках, режущих инструментах (фрезах), приспособлениях для фрезерных станков, особенностях фрезерования различных обрабатываемых поверхностей, а также контроле, организации рабочего места фрезеровщика и охране труда.

В приложении приведены технические условия и размеры на фрезы по стандартам, действующим с 1 января 2010 г.

Рекомендуется для фрезеровщиков, может быть полезен для подготовки рабочих на производстве, а также для учащихся учреждений среднего профессионального образования.

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

## Инновационные технологии сборочного производства изделий специального машиностроения

*Рассмотрены принципы реализации концепции "диалектических инноваций" в процессе разработки технологий сборочного производства для решения задачи обеспечения качества изделий специального машиностроения.*

*In this work considered principles of realization conception "dialectical innovations" in process of development technologies assembly manufacture for determination task securing quality production especial machine building.*

**Ключевые слова:** сборочное производство, выходные параметры точности (ВПТ), технологическое обеспечение инновационные технологии.

**Keywords:** assembly manufacture, output parameters data accuracy (OPDA), technological support innovation technique.

В процессе решения задачи обеспечения качества изделий специального машиностроения в сборочном производстве сформирована и апробирована общая концепция технологического синтеза — концепция "диалектических инноваций". Существо ее заключается в синтезе конструкторско-технологических нововведений на диалектической основе научного мировоззрения.

В данном случае основной диалектический принцип "подвергать все сомнению", выступает в роли отнюдь не скептицизма и, тем более, нигилизма, а как методологическое требование во всех конкретных случаях технологического проектирования основывать принимаемые решения на результатах точностного анализа конкретных технологических ситуаций. Не пытаться искать годные на все случаи рецепты в затвержденных формулах технических решений предыдущих этапов эволюции, а руководствоваться базовыми принципами и методологией технологического синтеза.

Концепция "диалектических инноваций" реализуется в рамках технологического синтеза путем последовательного формирования функциональных характеристик и принципов физического осуществления разрабатываемых технологических процессов, а также

формирования последовательно функциональных и физических структур, конструктивно-компоновочных схем средств технологического оснащения [1].

В сборочном производстве решают две основные задачи. Одна из них вытекает непосредственно из общепринятого определения процесса сборки как совокупность приемов и операций по соединению деталей и сборочных единиц в определенной технической и экономически целесообразной последовательности для получения готовых узлов, агрегатов и изделий, полностью отвечающих установленным в конструкторской документации требованиям. Вторая — обусловлена необходимостью обеспечения на завершающем этапе производства заданных характеристик качества и надежности изготавливаемых изделий.

Технико-экономическое понятие "качество изделия" в отличие от философского понятия "качество", охватывает только те свойства изделия, которые связаны с возможностью обеспечения максимального соответствия численных значений технических характеристик изделия, являющихся показателями его качества, заданным в техническом задании и конструкторской документации. Как правило, качество изделия оценивают путем сравнения единичных, комплексных либо интегральных показателей качества с их соответствующими базовыми значениями.

Основными количественными параметрами качества изделий специального машиностроения, формируемыми и обеспечиваемыми технологической системой (ТС) сборочного производства являются выходные параметры точности (ВПТ), включающие выходные геометрические параметры (ВГП) и выходные масс-инерционные характеристики (ВМХ).

Номенклатуру и состав ВПТ формируют погрешности геометрических размеров, формы и расположения базовых и посадочных поверхностей изделий, погрешности величины массы, инерционных характеристик, положения центра масс собранного изделия и их количественные характеристики.

Для каждого конкретного изделия ВПТ имеют свой набор указанных погрешностей, состав и численные значения которых зависят от условий производства и эксплуатации. Для сборочной единицы ВПТ являются входными параметрами точности для собираемого из-



деля, для детали – входными параметрами точности для сборочной единицы [2].

В соответствии с принципом непрерывности формирования качества в процессе взаимодействия трех основных компонентов технологической системы сборочного производства "изделие–технология–оборудование" реализуется концепция системного подхода, включающего декомпозицию (анализ) процесса формирования выходных параметров точности изделия по сборочным операциям и последовательную композицию (синтез) технологических процессов сборки, функциональных и физических структур, конструктивно-компоновочных схем средств технологического оснащения (ТП и СТО сборочного производства).

Общая методология обеспечения качества изделий в процессе технической подготовки их производства включает комплекс организационно-технических мероприятий. Данный комплекс в процессе технологического проектирования направлен на формирование наиболее рациональной, с точки зрения обеспечения требуемых численных значений ВПТ, технологии сборки и контроля, а также на соблюдение заданных количественных норм точности при изготовлении СТО и реализации рабочих технологий в производстве.

Основными компонентами этого комплекса являются:

- формирование в соответствии с направлениями технологического прорыва массива исходных данных;
- выбор и обоснование в соответствии с особенностями технологического проектирования для конкретных изделий и предприятий-изготовителей стратегии и методов проектирования;
- математическое моделирование объекта исследований;
- точностной анализ и технологический синтез рабочей технологии и оборудования.

При этом ключевое значение имеют точностной анализ и технологический синтез, как две основные методологические составляющие технологического проектирования.

В научных исследованиях, как правило, преобладает элемент анализа, а при создании новой технологии (техники) – элемент синтеза. Синтез ведет к потенциально новым возможностям дальнейшего анализа, так как обеспечивает разработчиков новыми средствами, а целенаправленный (ведущийся в конкретном, обоснованном направлении) анализ способствует увеличению разнообразных синтезированных технологий и реализующих их СТО.

Точностной анализ, как метод научного исследования, включает комплекс мероприятий по выявлению закономерностей и исследованию процессов формирования параметров качества изделий, а также

разработку наиболее оптимальных (с точки зрения поставленной цели исследований) распределений точностных требований к изделию, технологическому процессу и реализующим его СТО [3].

Технологический синтез процессов и оборудования включает комплекс мероприятий по разработке на базе точностного анализа технологических процессов, функциональных и физических структур оборудования и, в конечном счете, рабочей технологической и конструкторской документации на проведение процессов сборки, контроля изделий, а также изготовления реализующих их в производстве СТО.

В единичном и мелкосерийном производствах крупногабаритных изделий, к ВПТ которых предъявляют повышенные требования, проектирование технологических процессов сборки имеет три характерные особенности:

- количественное уменьшение общих этапов проектирования в части разработки операционных технологий;
- количественное увеличение специальных этапов проектирования в части разработки СТО (от технического задания до разработки рабочей документации и опытного опробования);
- использование точностного анализа в качестве теоретической основы инженерного метода проектирования технологических процессов.

Следует также отметить, что в сборочном производстве общая структура описания объекта моделирования (с позиций системного подхода) базируется на тесной взаимосвязи и неразрывности физики процесса, технологии и оборудования (физических преобразований объекта, технологических процессов, обуславливающих эти преобразования и СТО, обуславливающих практическую реализацию данного технологического процесса), образующих в совокупности единую многоуровневую иерархическую систему. Степень детализации описания и конкретный вид модели зависят от этапа технологического проектирования и задач, стоящих перед разработчиками технологии и оборудования на данном этапе.

Представляется целесообразным разработку образцов техники нового и перспективного поколений вести параллельно с этапами совершенствования базовой техники, используя, например, модульный принцип разработки.

В основу функционально-модульного построения конструкций СТО заложены следующие принципы:

- инвариантность конструкций составных частей СТО, позволяющая применять их для различных видов технологии и типов оснащения;
- переналаживаемость конструкций и взаимозаменяемость функциональных составных частей СТО;





• конструктивная преемственность, возможность многократного применения функциональных составных частей СТО.

На основании указанных принципов проектирование конструкций нестандартного оборудования и технологической оснастки применительно к рассматриваемому классу объектов производства осуществляют путем использования составных частей, каждая из которых ориентирована на выполнение вполне определенной функции.

Важнейшим условием данного подхода является возможность декомпозиции разрабатываемой конструкции СТО на составные модули, которые в основном представляют собой унифицированные стандартизованные агрегаты, узлы, детали.

Простейшие составные части, выполняющие вполне определенные законченные элементарные рабочие и вспомогательные функции, являются элементами функционально модульной конструкции СТО при ее компоновке (например, элементы кинематики, базирования, фиксации, крепления, пневмо-гидроарматуры, элементы силовой аппаратуры, электроавтоматики и т.д.).

Совокупность функционально объединенных элементов, имеющая законченное конструктивное решение и выполняющая набор элементарных рабочих и вспомогательных функций, представляет собой функциональный блок (например, приводы и на-

правляющие, устройства питания, преобразования информации и т.д.).

### Вывод

*Для разработки наиболее перспективных технологий сборочного производства изделий специального машиностроения целесообразно, в соответствии с принципом непрерывности формирования качества в процессе взаимодействия трех основных компонентов технологической системы сборочного производства "изделие—технология—оборудование", реализовать концепцию системного подхода. Данный подход включает декомпозицию (анализ) процесса формирования выходных параметров точности изделия по сборочным операциям и последовательную композицию (синтез) технологических процессов сборки, функциональных и физических структур, конструктивно-компоновочных схем средств технологического оснащения.*

### Библиографический список

1. Медарь А.В. Методология технологического синтеза // Технология машиностроения. 2008. № 4. С. 78–81.
2. Медарь А.В. Направления развития методов и средств технологического обеспечения выходных параметров точности в сборочном производстве изделий ракетно-космической техники // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 12. С. 19–24.
3. Медарь А.В. Точностной анализ в технологическом проектировании сборочных процессов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 1. С. 37–42.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

## НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.Г. Сулов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.

2012. Объем 528 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-619-2 Цена 1500 р.



Изложены наукоемкие (высокие) технологии в машиностроении по всем технологическим пределам: производство материалов, отливок; получение заготовок обработкой давлением; сварочное производство; обработка заготовок; модификация поверхностных слоев деталей; сборочное производство.

Особое внимание уделено наукоемким технологиям при обработке заготовок (обработке на станках с ЧПУ и самообучающихся станках с адаптивным управлением) функционально-ориентируемым и модульным технологиям, лазерным, электро-физико-химическим и нанотехнологиям.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий. Может быть полезна для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей технических 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 621.733

**Е.С. Корчак**, канд. техн. наук (Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина)  
E-mail: helen\_korchak@ukr.net

## Обеспечение быстрого и эффективного монтажа станин гидравлических прессов колонного типа

*Рассмотрены основные тенденции конструирования станин гидравлических прессов колонного типа. Предложена последовательность выполнения монтажных работ для обеспечения длительной и надежной эксплуатации станин. Рассмотрена новая конструкция станины пресса колонной конструкции быстрого монтажа, приведена схема ее сборки. Даны практические рекомендации по совершенствованию конструкций станин и проведению их монтажа для реализации в промышленности.*

*The main tendencies of hydraulic press frames of columnar type designing are considered. Sequence of assembling work accomplishing to provide durable and reliable frame operation is proposed. New construction of hydraulic press frame of columnar type of speedy assembling is described; its assembling scheme is shown. Practical recommendations concerning improvement of the frame constructions and its assembling accomplishing to be realized in industry are given.*

**Ключевые слова:** станина, поперечина, колонна, монтаж, пресс гидравлический.

**Keywords:** frame, cross-beam, column, assembling, hydraulic press.

Станины гидравлических прессов представляют собой единую жесткую раму, образованную соединенными с помощью направляющих колонн верхней и нижней неподвижными поперечинами [1]. Потребность в создании более мощных гидравлических прессов влечет за собой увеличение габаритов их элементов, особенно нижних неподвижных поперечин, являющихся еще и рабочими столами. В таких случаях габариты этих поперечин нередко превышают размеры, установленные государственными стандартами и правилами перевозки грузов наземным и водным транспортом, что значительно усложняет процесс создания мощных гидравлических прессов [2].

В связи с этим фактом можно выделить следующие основные тенденции конструирования станин гидравлических прессов колонного типа.

Крупногабаритные узлы станин выполняют составными для осуществления их транспортировки на монтаж.

После монтажа собранная конструкция должна обеспечивать необходимое жесткое сопряжение составных узлов с другими элементами пресса и повышенную жесткость станины в целом для минимизации зазоров. Это вызвано необходимостью упредить раскрытие стыков при эксплуатации пресса, особенно в условиях эксцентричного нагружения [3], которое, как правило вызывает значительное раскачивание пресса.

Во время монтажа способ затяжки направляющих колонн станины пресса должен обеспечивать ее длительную и надежную эксплуатацию. Последовательность монтажных работ при этом предлагается следующая:

- крепят колонны в поперечинах и выставляют размер между ними;
- выполняют предварительную затяжку направляющих колонн – ступенчато нагружают пресс от минимального усилия до максимального рабочего с затягиванием упруго растянутых колонн после каждого нагружения пресса до выборки зазора с последующими многократными перемещениями подвижной поперечины вдоль колонн;
- дополнительно затягивают гайки при частотном нагружении пресса в пульсирующем режиме от максимального рабочего усилия до предельно допустимого с одновременной окончательной затяжкой гаек до полной выборки зазора.

Применение плоских бойков и их натяжение друг на друга при затяжке направляющих колонн позволяет избежать эксцентриситета во время нагружения и сделать конструкцию пресса более жесткой. При этом нет необходимости выполнять в каждой колонне центральные отверстия для размещения в них электронагревателей, обеспечивающих термическую затяжку гаек. Вследствие этого процесс монтажа упрощается, снижается трудоемкость и сокращаются сроки.

Станину пресса оснащают средствами регулирования взаимного расположения составляющих элементов, обеспечивающих необходимое соединение узлов пресса при сборке. К таким средствам можно отнести



дистанционные и эксцентричные втулки, проставки и кольца, наборы прокладок, пары "винт-гайка" и т.п.

Например, расстояние между неподвижными поперечинами может образовываться высотой полых проставок, охватывающих направляющие колонны и устанавливаемых поверх них [5]. В нижней неподвижной поперечине размещают эксцентричные втулки, взаимодействующие с поперечиной и полыми проставками. Соответствующие геометрические оси при монтаже станины выставляют путем поворота эксцентричных втулок. После окончательной затяжки направляющих колонн полые проставки находятся в напряженном сжатом состоянии, что предупреждает раскрытие стыков и повышает жесткость станины во время эксплуатации пресса.

Другим примером может быть использование фиксирующих втулок, сопряженных с направляющими колоннами конической посадкой [6]. В этом случае составляющие элементы станин становятся более технологичными, а ее конструкция значительно упрощается, обеспечивая возможность выполнения быстрого и эффективного монтажа.

Рассмотрим такую станину подробнее (рис. 1).

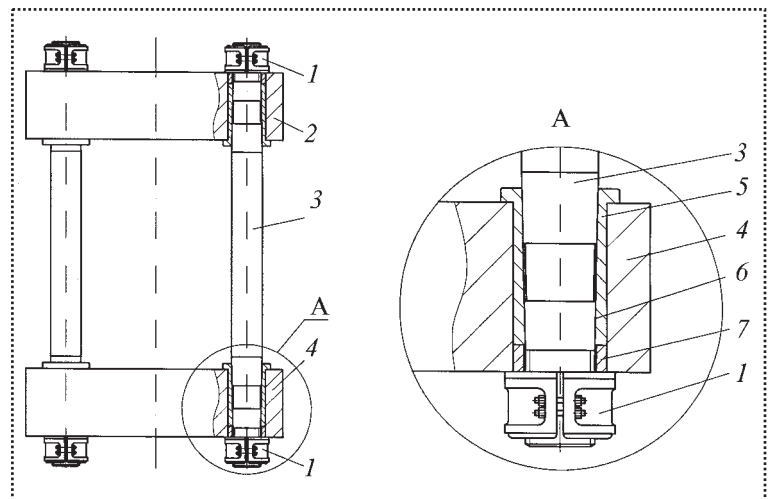
Полые втулки 5 установлены в сквозных отверстиях поперечин 2 и 4. Указанные отверстия выполнены бесступенчатыми. Втулки 5 фиксирующие, снабжены средствами фиксации и соединены с направляющими колоннами 3 посредством конических посадок 6. Между каждой втулкой 5 и гайкой 1 установлено дистанционное кольцо 7.

При монтаже станины устанавливают втулки 5 в отверстия поперечин 2 и 4 с натягом, заводят колонны 3 в отверстия втулок 5, вставляют дистанционные кольца 7 и соединяют гайки 1 (как правило, их выполняют разъемными с упорной резьбой) с резьбовыми концами направляющих колонн 3. Стягивают поперечины 2 и 4 гайками 1.

Соединение с натягом втулок 5 и отверстий в поперечинах 2 и 4 при монтаже станины осуществляют по методике, приведенной в работах [7, 8], которая иллюстрируется схемой сборки, показанной на рис. 2:

- в объектах запрессовывания (рис. 2, а) – полый втулке 3 и неподвижной поперечине 4 – выполняют заходной конус и элементы для выхода воздуха (в случае запрессовывания полый втулки 3 в глухое отверстие), очищают контактные поверхности втулки 3 и поперечины 4 от заусенцев и загрязнений;

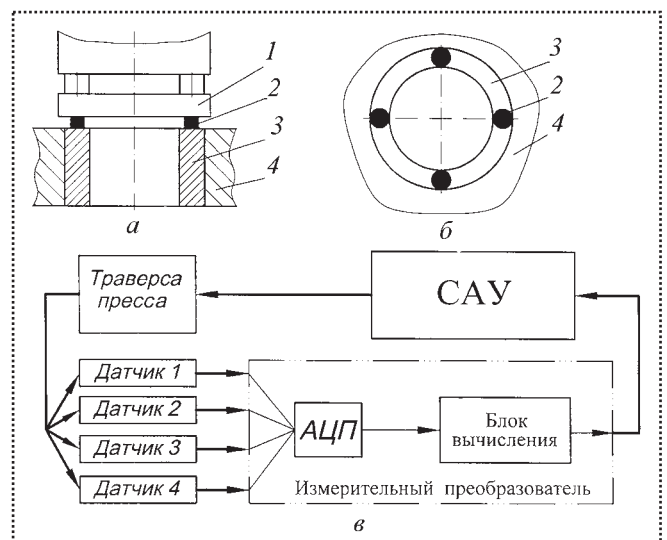
- позиционируют втулку 3 в отверстии поперечины 4 и сопрягают их путем нажатия траверсы 1 гидравлического пресса на втулку 3 до получения необ-



**Рис. 1. Станина пресса колонной конструкции быстрого монтажа:**  
1 – гайка; 2 и 4 – верхняя и нижняя неподвижные поперечины; 3 – направляющая колонна; 5 – полая втулка; 6 – коническая посадка; 7 – дистанционное кольцо

ходимого взаимного расположения объектов запрессовывания;

- рабочее перемещение траверсы 1 гидравлического пресса определяется измерительным преобразователем (рис. 2, б), блоки датчиков 2 которого устанавливают в четырех точках по периметру контактной площади полый втулки 3 с траверсой 1 в двух взаимно перпендикулярных (диаметрально противоположных) направлениях; при этом предварительно втулку 3 ориентируют относительно отверстия поперечины 4 без высокой точности позиционирования,



**Рис. 2. Схема сборки соединения с натягом (а) с блоками датчиков (б) и системой управления (в) процессом запрессовывания:**

1 – траверса; 2 – датчик; 3 – полая втулка; 4 – неподвижная поперечина



а при приложении усилия прессования на контактной поверхности втулки 3 и траверсы 1 в четырех точках возникают напряжения, пропорциональные сигналам блоков датчиков 2;

- указанные сигналы (рис. 2, в) обрабатываются аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и приобретают цифровые значения, обрабатываемые затем блоком вычисления, численные результаты из которого направляются в систему автоматического управления (САУ) гидравлическим прессом, где автоматически осуществляется выравнивание траверсы 1 до тех пор, пока не будут достигнуты одинаковые значения показаний усилий на всех блоках датчиков 2.

Таким образом, с помощью постоянного контроля усилия запрессовывания, в зависимости от которого осуществляется выравнивание траверсы 1 гидравлического пресса, обеспечивается равномерность запрессовывания и высокое качество соединения с натягом втулок и отверстий в поперечинах при монтаже станины колонного типа.

Качество монтажных работ станин может быть существенно улучшено использованием платформ для монтажа, которые размещают на полу цеха возле места под монтаж оборудования [9]. На этих платформах устанавливают и настраивают контрольно-измерительные приборы и средства сборки, размещают объекты сборки. В качестве таких платформ могут применять специальные площадки для монтажа с защитой от внешних воздействий. Преимущество их использования по сравнению с традиционной сборкой оборудования непосредственно на полу цеха заключается в устранении влияния внешних факторов на качество сборочных и монтажных работ — вибраций и колебаний, идущих от работающего рядом с монтажной площадью оборудования; пыли и грязи, появляющихся в результате реализации в цехе технологических процессов; свойств самого пола цеха (неровности, уклон) и т.д.

Резюмируя сказанное, можно отметить, что в общем случае технологическое назначение и условия транспортировки заказчику определяют конструктивное исполнение каждой конкретной станины пресса, а значит, и технологию ее монтажа. Однако существуют общие рекомендации проектирования станин гидравлических прессов колонного типа [10]. К основным из них можно отнести следующие:

- достижение простоты конструкции путем использования как можно меньшего числа составных элементов и узлов;
- повышение технологичности и снижение трудоемкости изготовления составных элементов;
- упрощение монтажа и контроль его качества;
- отсутствие после монтажа и во время эксплуатации пресса на стыковых поверхностях станины на-

пряжений, способных вызвать быстрый износ и разрушение элементов конструкции [11];

- достижение высоких жесткости и устойчивости составных элементов конструкции, препятствующих возникновению пластических деформаций, способных вызвать нарушение параллельности и перпендикулярности осей соответствующих элементов станины;
- отсутствие технических и технологических трудностей для изготовления элементов станины известными приемами металлообработки.

Таким образом, комплексная реализация рассмотренных в статье технических решений и перечисленных мероприятий направлена на создание надежных и долговечных станин гидравлических прессов колонного типа и обеспечение их быстрого и эффективного монтажа.

### Библиографический список

- Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение, 2005. Т. IV-4: Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства / Ю.А. Бочаров, И.В. Матвеев и др. Под общ. ред. Ю.А. Бочарова, И.В. Матвеева. 926 с.
- Корчак Е.С., Быковский В.Н.** Тенденции конструирования станин гидравлических прессов колонного типа // Станочный парк. 2011. № 1–2. С. 33.
- Коркин Н.П.** Система управления прочностными и технологическими параметрами гидравлического пресса со станиной колонного типа / КШП–ОМД. 2008. № 6. С. 21–26.
- Патент 31440** Украины. МПК В30 В15/00. Способ монтажа гидравлического пресса / О.С. Корчак, М.М. Сухина. Заявка № 200713244. Заявл. 28.11.2007. Опубл. 10.04.2008. Бюл. № 7.
- Патент 37366** Украины. МПК В30 В01/00. Станина пресса четырехколонной конструкции / Ю.В. Зоненко, Ю.В. Руденко, О.Г. Киселев, О.С. Вольвач, Н.А. Ткачев. Заявка № 200807970. Заявл. 12.06.2008. Опубл. 25.11.2008. Бюл. № 22.
- Патент 61520** Украины. МПК В30 В01/00. Станина пресса колонной конструкции быстрого монтажа / Е.С. Корчак, В.Н. Быковский. Заявка № 201014731. Заявл. 08.12.2010. Опубл. 25.07.2011. Бюл. № 14.
- Патент 65407** Украины. МПК В30 В 15/00. Способ сборки соединений с натягом при монтаже кузнечно-прессового оборудования / Е.С. Корчак, В.Н. Быковский. Заявка № 201104407. Заявл. 11.04.2011. Опубл. 12.12.2011. Бюл. № 23.
- Корчак Е.С.** Автоматизированная система диагностики перекоса подвижных траверс // Станочный парк. 2012. № 6. С. 30–31.
- Патент 64921** Украины. МПК В21 В15/00. Способ сборки кузнечно-прессового оборудования / Е.С. Корчак, В.Н. Быковский. Заявка № 201104398. Заявл. 11.04.2011. Опубл. 25.11.2011. Бюл. № 22.
- Korchak E.S., Bykovsky V.N.** How to project reliable and durable hydraulic press frames of columnar type / Proceedings of the 11 th International conference "Research and development in mechanical Industry" RaDMI 2011. 15–18 September. 2011. Sokobanja, Serbia. Vol. 2. P. 1137–1141.
- Коркин Н.П., Кулагин Д.А., Моисеев А.П., Сурков И.А.** Анализ отказов, предупреждение разрушений и восстановление базовых деталей мощных гидравлических прессов // Технология легких сплавов. 2006. № 1–2. С. 181–189.

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

## Координатная система точного позиционирования объекта в нанометрическом диапазоне

*Показаны некоторые результаты разработки прецизионных координатных наносистем на основе обратного пьезоэффекта. Такие системы представляют собой качественно новый тип привода координатной системы, исключающий применение громоздкой классической схемы: двигатель – редуктор – тяговая пара.*

*Some results of elaboration of precise coordinate nanosystems on the reverse piezoeffect are shown. These systems imitate an absolutely new type of the coordinate system drive which eliminates the use of the bulky classic scheme: engine – reducer – traction couple.*

**Ключевые слова:** координатная система, обратный пьезоэффект, наносистема.

**Keywords:** coordinate system, reverse piezoeffect, nanosystem.

Необходимость дальнейшего уменьшения дискретности позиционирования координатного стола (КС) вызвана спецификой технологических процессов, в частности при производстве изделий микроэлектроники, например, совмещения полупроводниковых пластин с фотошаблоном на операциях фотолитографии, инструмента – с контактными площадками на операциях зондового контроля, сборки и т.д.

В результате проведенных исследований был создан необходимый задел по разработке прецизионных координатных наносистем на основе обратного пьезоэффекта. Такие системы представляют собой качественно новый тип привода КС, исключающий применение громоздкой классической схемы: двигатель – редуктор – тяговая пара винт–гайка (ВГ).

Координатный стол с высокочастотными (ВЧ) пьезокерамическими преобразователями (ПКП) позволяет работать в нанодиапазоне перемещений объекта: по линейным координатам  $x$ ,  $y$  – от 100 до 10 нм; по угловой координате  $\varphi$  – от 10 до 1'.

В основе механизма точного позиционирования с пьезоактивным элементом лежит преобразование механических колебаний ультразвукового диапазона (от

20 кГц до 5 МГц) в непрерывное или шаговое движение каретки КС. Работает ПКП в режиме резонанса, а амплитуда его колебаний составляет 0,1...1,0 мкм.

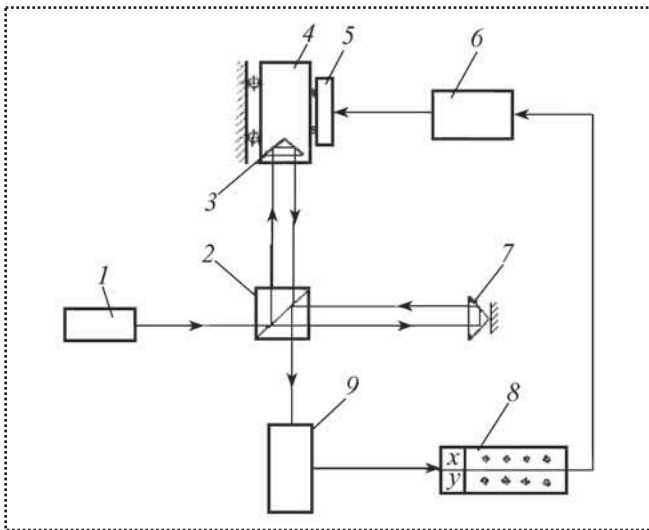
Для высокочастотных ПКП используют материалы с высокой пьезоактивностью, например, промышленную пьезокерамику или магнитострикционные материалы. Такие материалы позволяют создавать ПКП с высокой разрешающей способностью по перемещению в широком температурном диапазоне при полном отсутствии влияния паразитных электромагнитных полей.

Особенно важно, что ПКП обладают хорошими динамическими качествами в переходных режимах движения, т.е. при пуске и останове, в старт-стопном и шаговом режимах, поскольку ПКП с момента отключения питания оказывает тормозящее действие на каретку.

Как правило, ПКП представляет собой пьезокерамический стержень прямоугольного сечения (или пакет пластин), на плоскость которого нанесено токопроводящее покрытие. К металлизированному покрытию припаяны электроды, соединяющие ПКП с ВЧ генератором, вырабатывающим напряжение питания 30...90 В частотой в среднем 30 кГц. Под действием переменной ЭДС в ПКП возникают механические колебания (например, за счет сжатия–растяжения стержня) с частотой  $E$ .

Шаг и погрешность перемещения каретки 4 (рис. 1) от ПКП 5 с высокой степенью точности могут быть измерены с помощью лазерного интерферометра, включающего когерентный источник 1 с длиной волны  $\lambda = 0,64$  мкм.

Луч света от источника 1 попадает на светоделитель 2, где расщепляется на два луча. Один луч (информационный) направляется на подвижный светотрагатель 3, связанный с кареткой 4, а второй луч (опорный) – на неподвижный светотрагатель 7. При перемещении каретки изменяется оптическая разность хода лучей, отраженных от подвижного и неподвижного светотрагателей, в результате чего в поле фотоприемника 9 образуются интерференционные полосы, которые последний преобразует в электрические сигналы. Эти сигналы поступают для обработки в систему управления 8.



**Рис. 1.** Схема измерения минимального шага и погрешности перемещения каретки КС от ПКП с помощью лазерного интерферометра:

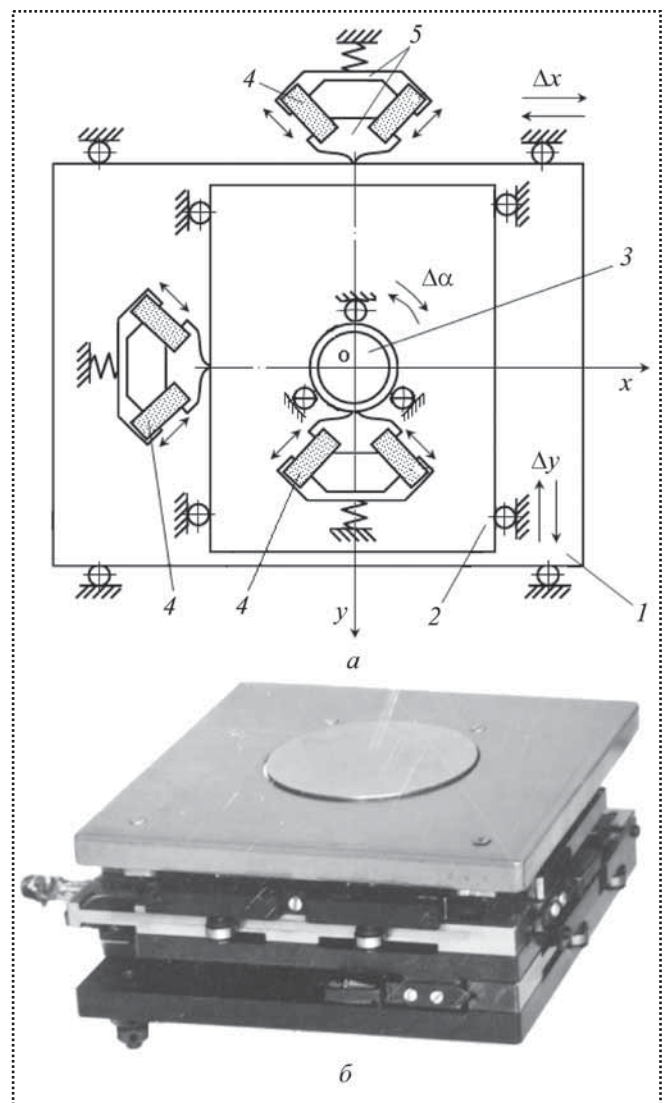
1 – источник; 2 – светоделитель; 3 – светоотражатель; 4 – каретка; 5 – ПКП; 6 – ВЧ генератор; 7 – светоотражатель; 8 – система управления; 9 – фотоприемник

Расстояние между интерференционными полосами составляет  $1/8 \lambda$ . Результат перемещения каретки высвечивается на табло системы управления. Для определения минимального шага  $s_{\min}$  каретки на ПКП 5 с ВЧ генератора 6 подаются единичные шагозадающие импульсы различной длительности  $l_{и.п}$ . Предельная длительность шаговых импульсов, при которой возбуждается пьезокерамический преобразователь и наблюдается движение каретки,  $l_{инп} = 4,8 \cdot 10^{-4}$  с, а стабильное движение каретки будет иметь место при  $s_{\min} = 0,06$  мкм. Полученное значение  $s_{\min}$  представляет собой чувствительность системы точного позиционирования (СТП) на ПКП.

Для определения погрешности перемещения каретки в систему управления вводят необходимый диапазон ее движения. С генератора 6 на обкладки ПКП 5 подаются шаговые импульсы с длительностью  $l_{и.п}$  и частотой следования 1,0 кГц, а перемещение каретки регистрируется лазерным интерферометром измерительной системы. По результату сравнения импульсов программного устройства системы управления 8 и измерительной системы ПКП отключается и каретка фиксируется. Значение погрешности перемещения каретки высвечивается на табло системы управления. В диапазоне движения каретки от нуля до 100 мм погрешность перемещения составляет  $\pm 0,16$  мкм при скорости движения порядка 2 мм/с. Взаимное влияние координат при перемещении не превышает 10%. Основными дестабилизирующими факторами, вызывающими отклонение шага  $s$  каретки от его номи-

нального значения, являются изменение коэффициента трения на длине контакта пьезокерамической пластины с кареткой и изменение амплитуды колебаний пластины в результате изменения длительности импульса питания и резонансной частоты  $\omega_p$ .

В трехкоординатной системе точного позиционирования (рис. 2, а) с каретками 1, 2 и поворотным столом 3 контактируют блоки из двух пьезокерамических преобразователей 4, установленных под углом  $90^\circ$  друг к другу. Контакт осуществляется через специальный держатель 5 из закаленной стали, а усилие поджима регулируется с помощью пружины. Сцепление держателя с кареткой обеспечивается силами кон-



**Рис. 2.** Схема трехкоординатного стола на пьезокерамических преобразователях (а) и его общий вид (б):

1 – нижняя каретка; 2 – верхняя каретка; 3 – поворотный стол; 4 – пьезокерамический преобразователь ВЧ колебаний; 5 – держатель ПКП

тактного трения, а перемещение каретки происходит под действием косых ударов высокой частоты. Реверс движения каретки производится путем переключения ПКП в блоке.

Характеристики координатного стола с ПКП:

- линейная скорость – 0,1 м/с;
- угловая скорость – 10...30 рад/с;
- время разгона подвижного звена (каретки) – единицы миллисекунд, а время торможения – на 30...50 % меньше;
- диапазон регулирования скорости – до  $10^6$ ;
- взаимное влияние координат при перемещении по  $x$  и  $y$  – не более 10 %;
- усилие, развиваемое при номинальной скорости – до 10 Н;
- максимальная нагрузка на ползун – до 20 Н;
- КПД пьезокерамического преобразователя – 0,1.

Рабочая частота, механические характеристики, мощность, динамические качества переходных режимов перемещения подвижного звена полностью определяются параметрами ПКП высокочастотных упругих колебаний твердого тела в направленное многомерное движение рабочего органа манипулятора или технологической машины.

Внешний вид опытного образца трехкоординатной системы точного позиционирования с приводами на ПКП, на котором хорошо видно отсутствие классических приводов и механических преобразователей движения показан на рис. 2, б.

При отключении питания ПКП каретка КС достаточно надежно фиксируется силами трения, поэтому такая система относится к системам с самоторможением. Однако в подобных координатных системах могут применять и специальные меры фиксации подвижного звена. В частности, можно дополнительно фиксировать каретки КС в нужном положении при отключении питания с помощью электромагнита (рис. 3).

К недостаткам координатных систем на ПКП следует отнести повышенный износ поверхностей в зоне контакта и необходимость применения датчиков обратной связи по положению из-за отсутствия однозначной зависимости между числом периодов колебаний пьезопреобразователя и положением подвижного звена. Последний недостаток может быть компенсирован применением современной системы управления. Одна из таких систем представлена на рис. 4. В систему управления КС 11 с ПКП 10 входят: измерительный преобразователь 1; блок интерполирования БИ; линейный блок управления (ЛБУ) по координатам  $x, y$ ; генератор высокочастотного напряжения 8 и блок автоматической подстройки частоты 9.

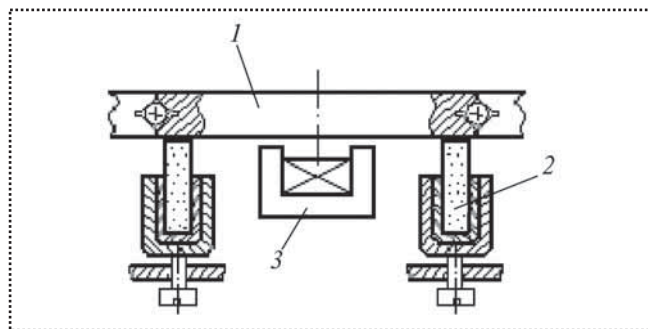


Рис. 3. Схема фиксации каретки КС с приводами на ПКП с помощью магнитного поля:

1 – каретка; 2 – ПКП; 3 – электромагнит

При подаче высокочастотного напряжения с генератора 8 на пьезопреобразователь 10 последний возбуждается на резонансной частоте и перемещает каретку координатного стола 11 по программе, записанной в программном устройстве 5 ЛБУ.

Модулированный световой поток, проходящий через растры подвижной и неподвижной линеек измерительного преобразователя 1, преобразуется в синусоидальный сигнал, период которого соответствует перемещению каретки КС на один шаг. Фазовый делитель 2 и формирователь импульсов 3 БИ преобразуют синусоидальные сигналы в прямоугольные импульсы, которые поступают в блок счета импульсов 4, а затем в блок-схемы сравнения 6 ЛБУ.

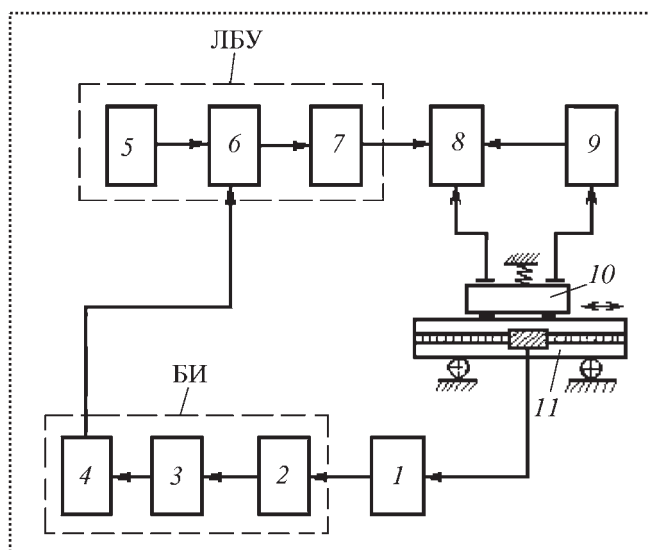


Рис. 4. Схема системы управления СТП с приводами на ПКП:

ЛБУ – линейный блок управления по координатам  $x, y$ ; БИ – блок интерполирования; 1 – измерительный преобразователь; 2 – фазовый делитель; 3 – формирователь импульсов; 4 – блок счета импульсов; 5 – программное устройство; 6 – блок-схемы сравнения; 7 – согласующий усилитель; 8 – генератор высокочастотного напряжения; 9 – блок автоматической подстройки частоты; 10 – ПКП; 11 – координатный стол



Каретка движется до тех пор, пока имеется рассогласование между действительным и записанным в программе перемещением КС.

При рассогласовании, равном нулю, через согласующий усилитель 7 подается команда на отключение генератора 8. Под действием дестабилизирующих факторов резонансная частота ПКП может изменяться, в результате чего изменится шаг и, следовательно, скорость перемещения каретки. Для стабилизации шага с электродов ПКП снимается электрический сигнал, пропорциональный амплитуде механических колебаний пьезопреобразователя (прямой пьезоэффект), который подается на вход генератора 8 через блок подстройки частоты 9.

Пьезопреобразователи в качестве вибродвигателей могут найти применение и в приводах мини- и микророботов. Например, в работе [1] приведена конструкция мини-манипулятора робота с четырьмя степенями подвижности (без захвата), который содержит один электродвигатель для вертикального перемещения руки по оси  $z$ , два пьезопреобразователя для горизонтального перемещения ее по осям  $x$ ,  $y$  и один пьезопреобразователь для вращения руки вокруг вер-

тикальной оси. Измерение линейных и угловых перемещений осуществляется измерителем, включающим оптические растровые линейки и фотоэлектрический преобразователь.

### Вывод

*Созданный в результате исследований необходимый задел позволяет проводить разработку промышленного образца прецизионных координатных наносистем на основе обратного пьезоэффекта. Новый тип привода координатного стола с высокочастотными пьезокерамическими преобразователями позволяет работать в нанодиапазоне перемещений объекта: по линейным координатам  $x$ ,  $y$  – от 100 до 10 нм; по угловой координате  $\varphi$  – от 10 до 1'.*

### Библиографический список

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

### Читайте в следующем номере:



- ✓ **Коптев И.И., Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В., Салтанаева Е.А.** Изготовление и комплектация форсунок для подачи горючих смесей
- ✓ **Божкова Л.В., Вартанов М.В., Матынович Н.А.** Математическая модель динамики сопряжения деталей с применением промышленного робота и вибрационного устройства
- ✓ **Абрамов А.И., Абрамов И.В., Романов А.В.** Научно-технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки соединения с натягом
- ✓ **Иванов А.А.** Промышленные роботы в сборочном производстве
- ✓ **Костюков В.Н., Костюков Ал.В., Щелканов А.В.** Стендовая система ультразвукового контроля вкладышей подшипников скольжения КОМПАКС-УЗД
- ✓ **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Определение вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал-втулка" при выборе селективных интервалов
- ✓ **Фомин А.А.** Влияние дополнительной опоры заготовки в зоне резания на устойчивость процесса обработки
- ✓ **Челпанов И.Б., Кочетков А.В.** Совершенствование методов виброиспытаний с применением вибростендов



УДК 62–755; 621.317.4

Р.М. Гоцеридзе, канд. техн. наук, С.В. Румянцев, инженер (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: Ruslan.Gotseridze@gmail.com

## Применение балансирующего станка с магниторезонансным подвесом для измерения параметров уравновешенности поплавковых чувствительных элементов

*Рассмотрен магниторезонансный подвес с регулируемой жесткостью и чувствительностью, используемый как датчик сил и линейных перемещений с целью измерения параметров неуравновешенности поплавкового чувствительно элемента в жидкости.*

*In article is considered magnetic-resonance suspension with controlled acerbity and sensitivity, which is used as sensor of power and linear displacement for the reason measurements parameters unbalance of floating detector element in liquids.*

**Ключевые слова:** магниторезонансный подвес, балансирующий станок, поплавковый чувствительный элемент, балансировка, измерение, уравновешивание, чувствительность, управляемый усилитель, датчик.

**Keywords:** magnetic-resonance suspension, balancing tool, floating detector element, balancing, measurement, balance, sensitivity, operated amplifier, sensor.

Поплавковые приборы ориентации и навигации остаются на сегодняшний день одними из самых точных приборов. Точность и надежность их работы в значительной степени зависят от точности их изготовления, сборки и балансировки их поплавковых чувствительных элементов – ПЧЭ (инерционных датчиков).

Для измерения параметров неуравновешенности ПЧЭ применяют балансирующие станки с магниторезонансным подвесом (МРП), который используют для центрирования ПЧЭ и измерения параметров его неуравновешенности. В таких балансирующих станках используют два элемента МРП для поддержания ПЧЭ в горизонтальном положении в процессе измерений дисбаланса.

Магниторезонансный подвес является своего рода уникальной системой, которая позволяет измерять силы и дисбалансы, действующие со стороны ротора и представляет собой электромагнитную опору враще-

ния (подшипник), в которой отсутствует механическое трение. Отсутствие механического трения позволяет получать высокоточные результаты измерений осевой неуравновешенности.

Кроме того, электрическая схема МРП такова, что помимо создания бесконтактной опоры, или точнее, подвески в электромагнитном поле ротора, она позволяет измерять радиальные силы и радиальные перемещения, действующие на опору со стороны исследуемого ПЧЭ. При создании электромагнитного поля для подвески ротора, токи и напряжения в полюсах МРП перераспределяются так, что их соотношения отражают силы, действующие со стороны ротора ПЧЭ на опоры МРП. Измеряя соответствующие токи и напряжения в обмотках возбуждения МРП после последующей математической обработки, можно получить искомые параметры неуравновешенности изделия. На основе этих важных качеств МРП были созданы конструкции балансирующих станков и устройств, которые с успехом применяют в приборостроении при выпуске приборов инерционной навигации.

Важным свойством МРП также является возможность дальнейшего развития и усовершенствования его конструкции с целью повышения таких технических показателей, как точность, универсальность, расширение диапазона измерений, перенастройка под разные режимы работы и т.д.

Рассмотрим один из способов повышения точности измерений неуравновешенности ПЧЭ при помощи МРП. Этот способ позволяет улучшить эксплуатационные характеристики МРП – его жесткость и чувствительность. Повышение точности происходит за счет введения в схему питания МРП усилителей с управляемым коэффициентом усиления сигнала обратной связи.

Как известно, точность современных поплавковых приборов, выраженная в скорости ухода, должна находиться в пределах нескольких долей угловых минут. Одной из составляющих основной погрешности поплавковых приборов, в наибольшей степени влияющей на этот показатель точности, является неуравно-



вешенность ПЧЭ по статическому моменту относительно оси подвеса.

Другой существенной составляющей основной погрешности является составляющая от момента трения в опорах. Условием достижения минимального момента трения в опорах является обеспечение нулевой плавучести и нулевого момента дифферента ПЧЭ, когда его сила тяжести уравнивается подъемной силой и продольная ось параллельна оси подвеса.

Для уравнивания (балансировки) ПЧЭ относительно оси вращения и для полной разгрузки его опор необходимо, чтобы были выполнены следующие условия:

- 1) плавучесть ПЧЭ должна быть равна нулю, т.е.  $P = G$ ;
- 2) центр давления должен совпадать с центром масс;
- 3) центр давления и центр масс должны лежать на оси вращения.

Статическое уравнивание в жидкости состоит в сближении центра тяжести ПЧЭ с центром его объема до тех пор, пока разность моментов вокруг оси подвеса ПЧЭ от выталкивающей силы  $P$  и от его силы тяжести  $G$  не будет находиться в допустимых пределах при любом положении ПЧЭ.

Для измерения параметров статической неуравновешенности ПЧЭ применяют специальные балансировочные станки с двумя МРП. Эти подвесы обладают свойством центрирования рамки с поплавком, причем без механического контакта между ротором рамки и опорой. Отсутствие механического контакта позволяет исключить погрешности от сухого трения в опорах. Подвес позволяет измерить параметры неуравновешенности: остаточную силу тяжести (или плавучесть)  $\Delta G$  и момент дифферента  $M_d$  ПЧЭ за счет измерения токов в обмотках возбуждения подвеса.

Измерение статического момента  $M_{ст}$  производится при помощи датчика момента, в этом случае МРП используется только как опора без трения.

С целью достижения более высокой точности балансировки ПЧЭ с помощью МРП необходимо выполнение следующих двух условий:

- 1) при измерении  $M_{ст}$  необходимо для уменьшения погрешности обеспечить максимальную жесткость центрирующих элементов подвеса в радиальном и осевом направлениях;
- 2) при измерении  $M_d$  и  $\Delta G$  необходимо обеспечить переменную чувствительность и жесткость МРП, поскольку в процессе балансировки ПЧЭ силы, действующие на его цапфы, а следовательно и роторы МРП, изменяются в широких пределах. Поэтому в начале балансировки требуется высокая жесткость и грузоподъемность подвеса. Чувствительность при этом будет невысока. При окончательной балансировке

силы, действующие на ПЧЭ, будут минимальными, и при этом требуется высокая чувствительность измерений.

Жесткость и чувствительность МРП зависят от крутизны токовой характеристики. Чем она больше, тем больше жесткость и чувствительность подвеса как датчика линейных перемещений. Чувствительность же МРП, как датчика силы, определяется иначе, чем МРП – датчика линейных перемещений, она будет рассмотрена далее.

Крутизна токовой характеристики обычной схемы МРП является постоянной, что не позволяет изменять жесткость и чувствительность в зависимости от требований балансировки. Для обеспечения возможности регулирования крутизны токовой характеристики была разработана схема включения обмоток МРП, показанная на рис. 1. Полная электрическая схема балансировочного станка включает два одинаковых МРП, выполненных по указанной схеме, и датчик момента для измерения  $M_{ст}$ , выполненный по известной схеме магнитной пружины.

Как видно из рис. 1, помимо элементов  $L, C, R$ , эта схема имеет управляемые усилители  $A1$  и  $A3$ , включенные в каждую из вертикальных ветвей МРП с обмотками  $L_1$  и  $L_3$ .

По существу, схема представляет собой источник питания контуров МРП с изменяемым напряжением. Изменение напряжения задается с помощью сигнала обратной связи, снимаемого с измерительного сопротивления и пропорционального току в цепи МРП. Так, при смещении ротора и уменьшении индуктивности катушки возрастание тока в ее цепи вызовет увеличение сигнала обратной связи, подаваемого на управляемый усилитель. Управляемый усилитель содержит схему управления коэффициентом усиления.

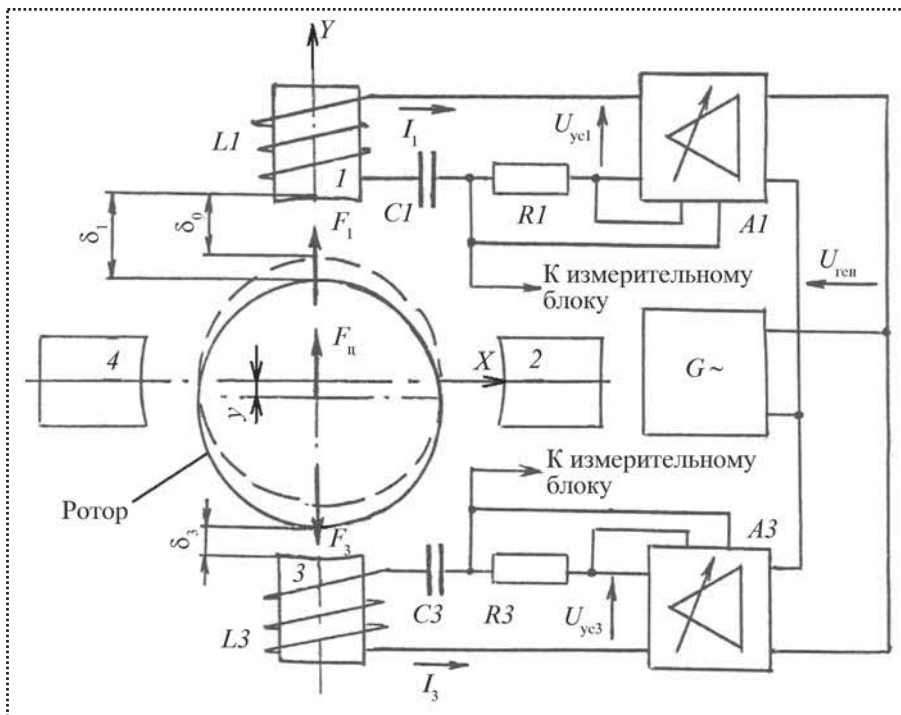
Изменение коэффициента усиления, в данном случае – его увеличение – вызовет возрастание напряжения на выходе усилителя, а следовательно, увеличение тока в обмотке возбуждения.

Таким образом, за счет применения схемы МРП с обратной связью по усилению напряжения имеется возможность путем регулирования глубины обратной связи управлять крутизной токовой характеристики, а следовательно, жесткостью подвеса и чувствительностью измерения сил и линейных перемещений якоря.

Получим выражение для тока и для центрирующей силы МРП, для чего введем следующие обозначения (см. рис. 1):

- $F_1$  – сила притяжения полюса 1;
- $F_3$  – сила притяжения полюса 3;
- $F_{ц} = F_1 - F_3$  – радиальная центрирующая сила МРП;

•  $\delta_0$  – длина зазора между полюсами и якорем при центральном положении последнего;



**Рис. 1. Схема магниторезонансного подвеса с управляемыми усилителями:**  
 1, 2, 3, 4 – полюса статора;  $L1, L3$  – индуктивности обмоток полюсов 1 и 3 статора;  $C1, C3$  – конденсаторы;  $R1, R3$  – сопротивления;  $A1, A3$  – усилители;  $G$  – генератор;  $U_{ген}$  – напряжение генератора;  $U_{yc1}, U_{yc3}$  – напряжения на выходе усилителей полюсов 1 и 3;  $\delta_0, \delta_1, \delta_3$  – зазоры между ротором и полюсами статора;  $I_1$  и  $I_3$  – токи в обмотках полюсов 1 и 3

- $\delta_1$  и  $\delta_3$  – текущие зазоры между якорем и полюсами 1 ( $\delta_1 = \delta_0 + y$ ) и 3 ( $\delta_3 = \delta_0 - y$ ) МРП соответственно,  $\delta_p$  – зазор между полюсом и якорем, соответствующий резонансу напряжений,  $\delta_p = \delta_0 + y_p$ ;
- $y$  и  $y_p$  – перемещения ротора вдоль оси  $y$ , соответственно в рабочей области и при резонансе;
- $\delta_{1,3} / \delta_0 = 1 \pm \varepsilon$  и  $\delta_p / \delta_0 = 1 + \varepsilon_p$  – относительные зазоры ротора в рабочей области и при резонансе;
- $\varepsilon = y / \delta_0$ ,  $\varepsilon_p = y_p / \delta_0$  – относительные перемещения ротора в рабочей области и при резонансе;
- $I_p$  – действующее значение тока при резонансе напряжений.

Запишем уравнение для комплексных значений амплитуд напряжений и токов в цепи МРП:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{yc1} &= \left( R_{\Sigma} + j \omega L_1 + \frac{1}{j \omega C} \right) \dot{I}_1; \\ \dot{U}_{yc3} &= \left( R_{\Sigma} + j \omega L_3 + \frac{1}{j \omega C} \right) \dot{I}_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{U}_{yc1}$  и  $\dot{U}_{yc3}$  – комплексная амплитуда напряжения на выходе управляемого усилителя соответственно  $A1$  и  $A3$ ;

$R_{\Sigma}$  – сумма всех активных сопротивлений контура МРП;

$\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_3$  – комплексная амплитуда тока в цепях с обмотками полюсов 1 или 3.

Так как напряжение на выходе управляемого усилителя зависит от управляемого коэффициента усиления, то можно записать:

$$\dot{U}_{yc1} = K_{y1} \dot{U}_{ген}; \quad \dot{U}_{yc3} = K_{y3} \dot{U}_{ген}, \quad (2)$$

где  $K_{y1}$  и  $K_{y3}$  – коэффициенты усиления управляемых усилителей 1 или 3;

$\dot{U}_{ген}$  – напряжение, подаваемое на усилитель с генератора.

Тогда из выражения (1) с учетом формулы (2) получим

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{K_{y1} \dot{U}_{ген}}{R_{\Sigma} + j \omega L_1 + \frac{1}{j \omega C}}; \\ \dot{I}_3 &= \frac{K_{y3} \dot{U}_{ген}}{R_{\Sigma} + j \omega L_3 + \frac{1}{j \omega C}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Напряжение обратной связи, подаваемое на вход управления коэффициентом усиления усилителя, снимается с измерительного сопротивления  $R1$  или  $R3$ . Следовательно, коэффициент усиления одного контура МРП будет пропорционален току, протекающему через измерительное сопротивление  $R1$  или  $R3$ .

Если принять линейную зависимость коэффициента усиления от тока, то можно записать:

$$K_{y1} = k \dot{I}_{1,0}; \quad K_{y3} = k \dot{I}_{3,0}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий глубину обратной связи (величину сигнала обратной связи);

$\dot{I}_{1,0}$  и  $\dot{I}_{3,0}$  – токи в обмотках, которые были бы при отсутствии усилителей, т.е. при единичном усилении по напряжению.

Выражение для токов  $\dot{I}_{1,0}$  и  $\dot{I}_{3,0}$  имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1,0} &= \frac{\dot{U}_{ген}}{R_{\Sigma} + j \omega L_1 + \frac{1}{j \omega C}}; \\ \dot{I}_{3,0} &= \frac{\dot{U}_{ген}}{R_{\Sigma} + j \omega L_3 + \frac{1}{j \omega C}}. \end{aligned} \quad (5)$$



Подставляя формулы (4) и (5) в выражение (3), получим формулу для определения тока в зависимости от глубины обратной связи:

$$\dot{I}_1 = k \dot{I}_{1,0}^2, \quad \dot{I}_3 = k \dot{I}_{3,0}^2. \quad (6)$$

Отсюда можно сделать вывод, что по сравнению с МРП без усилителя крутизна токовой характеристики МРП с усилителем возрастает пропорционально квадрату тока и может регулироваться за счет изменения коэффициента  $k$  – глубины обратной связи.

Перейдем к действующим значениям токов и получим выражение для тока  $I_{1,3}$  в зависимости от относительной величины смещения  $\varepsilon$ .

Выражения для токов  $\dot{I}_{1,0}$  и  $\dot{I}_{3,0}$  получены в работе [1]. Они имеют следующий вид:

$$\dot{I}_{1,0} = \frac{(1 + \varepsilon_p)(1 + \varepsilon)}{Z_{1u}}; \quad \dot{I}_{3,0} = \frac{(1 + \varepsilon_p)(1 - \varepsilon)}{Z_{3u}}, \quad (7)$$

где  $Z_{1u} = \sqrt{(1 + \varepsilon_p)(1 + \varepsilon)^2 + Q_u^2(\varepsilon_p - \varepsilon)^2}$  – комплексное сопротивление электромагнитной цепи полюса 1 МРП;

$Z_{3u} = \sqrt{(1 + \varepsilon_p)(1 - \varepsilon)^2 + Q_u^2(\varepsilon_p + \varepsilon)^2}$  – комплексное сопротивление электромагнитной цепи полюса 2 МРП.

Здесь  $Q_u$  – добротность обмоток при центральном положении ротора.

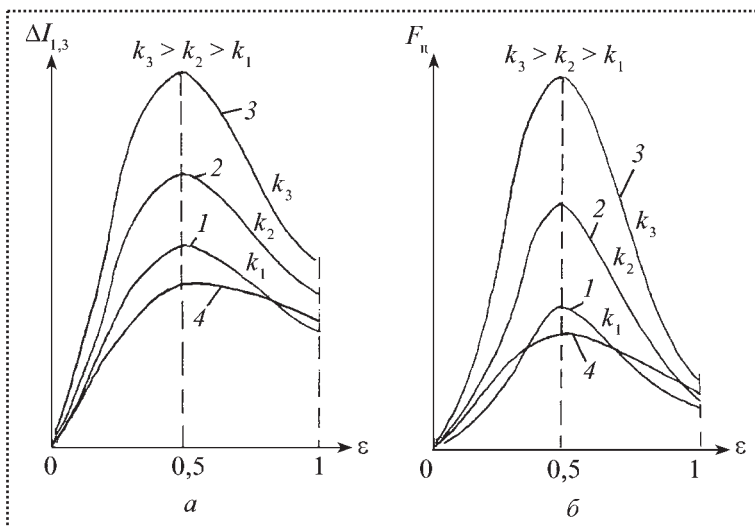


Рис. 2. Статические характеристики МРП (а –  $\Delta I_{1,3}$ , б –  $F_n$ ) при различных значениях глубины обратной связи  $k$ :

1, 2, 3 – кривые для МРП с управляемыми усилителями; 4 – кривая для обычной схемы МРП;  $\Delta I_{1,3}$  – разность токов в обмотках полюсов 1 и 3 при смещении ротора;  $F_n$  – радиальная центрирующая сила

Тогда выражение для токов  $I_1$  и  $I_3$  в обмотках МРП с управляемыми усилителями будет получено при подстановке выражений (7) в (6):

$$I_1 = k \left( \frac{(1 + \varepsilon_p)(1 + \varepsilon)}{Z_{1u}} \right)^2; \quad I_3 = k \left( \frac{(1 + \varepsilon_p)(1 - \varepsilon)}{Z_{3u}} \right)^2. \quad (8)$$

При использовании МРП как датчика сил и линейных перемещений обычно применяется измерение разностного тока  $\Delta I = I_1 - I_3$ , поскольку противоположные вертикальные обмотки образуют дифференциальную схему включения.

Выражение для разностного тока имеет вид

$$\Delta I_{1,3} = k(1 + \varepsilon_p)^2 \left( \frac{(1 + \varepsilon)^2}{Z_{1u}^2} - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{Z_{3u}^2} \right). \quad (9)$$

Из представленных на рис. 2, а графиков зависимости (9) видно, что угол наклона токовой характеристики МРП с управляемыми усилителями (кривые 1, 2, 3) имеет большую крутизну, чем у обычной МРП (кривая 4). Кроме того, крутизна токовой характеристики будет возрастать с увеличением параметра  $k$  в связи с ростом максимумов тока  $\Delta I_{1,3}$ . Таким образом, предложенная схема с управляемыми усилителями обладает более высокой чувствительностью при измерении линейных перемещений.

Выражение для электромагнитной силы притяжения полюсов 1 или 3 МРП согласно работе [1] имеет следующий вид:

$$F_1 = I_1 \frac{Q_u^2}{(1 + \varepsilon)^2}; \quad F_3 = I_3 \frac{Q_u^2}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (10)$$

Подставляя в формулы (10) выражения (8), получаем зависимость электромагнитной силы каждого полюса от относительного перемещения  $\varepsilon$ :

$$F_1 = k^2 (1 + \varepsilon_p)^4 Q_u^2 \frac{(1 + \varepsilon)^2}{Z_{1u}^4}; \quad (11)$$

$$F_3 = k^2 (1 + \varepsilon_p)^4 Q_u^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{Z_{3u}^4}.$$

Радиальная центрирующая сила равна разности сил  $F_n = F_1 - F_3$  (см. рис. 1):

$$F_n = k^2 (1 + \varepsilon_p)^4 Q_u^2 \left( \frac{(1 + \varepsilon)^2}{Z_{1u}^2} - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{Z_{3u}^2} \right). \quad (12)$$

Графики зависимости (12) представляют собой силовые характеристики МРП с управляемыми усилителями.

мыми усилителями. Из графиков на рис. 2, б видно, что с увеличением параметра  $k$  крутизна характеристики возрастает (кривые 1, 2, 3) по сравнению с графиком обычной МРП (кривая 4), что говорит о возрастании жесткости подвеса.

Для определения чувствительности МРП как датчика радиальной силы (силы, действующей на ротор МРП от статической неуравновешенности ПЧЭ по плавучести и дифференту) требуется получить зависимость  $\Delta I = f(F_{\text{ц}})$ . Получить аналитическую зависимость  $\Delta I = f(F_{\text{ц}})$  – затруднительно, но ее можно представить в параметрической форме, которая имеет вид:

$$\Delta I = f(\varepsilon) = k(1 + \varepsilon_p)^2 \left( \frac{(1 + \varepsilon)^2}{Z_{1\text{ц}}^2} - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{Z_{3\text{ц}}^2} \right); \quad (13)$$

$$F_{\text{ц}} = f(\varepsilon) = k^2 (1 + \varepsilon_p)^4 Q_{\text{ц}}^2 \left( \frac{(1 + \varepsilon)^2}{Z_{1\text{ц}}^2} - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{Z_{3\text{ц}}^2} \right).$$

Графики зависимости (13)  $\Delta I = f(F_{\text{ц}})$  (их рабочие области) представлены на рис. 3. При различных значениях  $k$  из графиков видно, что с уменьшением параметра чувствительность МРП как датчика силы возрастает, о чем свидетельствует увеличение крутизны характеристики на рабочем участке (кривые 1, 2, 3). На данном графике кривой 4 изображена силовая характеристика обычного МРП.

Таким образом, можно сделать вывод, что данная схема МРП с управляемыми усилителями позволяет

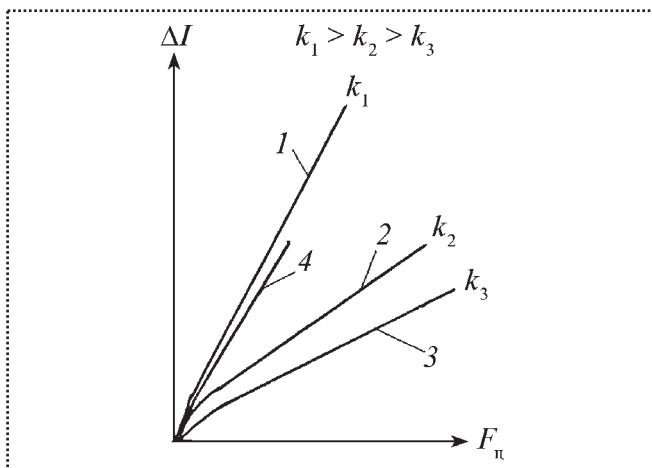


Рис. 3. Статические характеристики МРП при различных значениях глубины обратной связи  $k$ :

1, 2, 3 – кривые для МРП с управляемыми усилителями; 4 – кривая для обычной схемы МРП,  $\Delta I$  – разность токов в обмотках полюсов при смещении ротора;  $F_{\text{ц}}$  – радиальная центрирующая сила

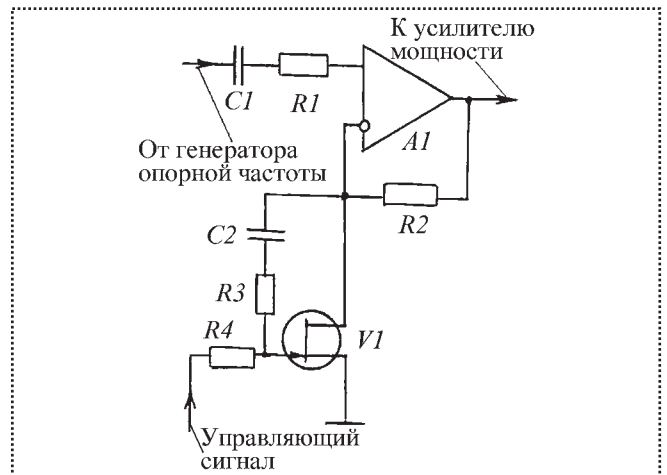


Рис. 4. Схема усилителя с управляемым коэффициентом усиления:

$C1, C2$  – конденсаторы;  $R1-R4$  – сопротивления;  $A1$  – операционный усилитель;  $VI$  – транзистор

управлять величиной чувствительности и жесткости МРП за счет изменения глубины обратной связи  $k$ , которая управляет коэффициентом усиления усилителей. С увеличением глубины обратной связи жесткость МРП возрастает, а чувствительность МРП как датчика силы уменьшается. Этот режим работы наиболее выгоден при измерении  $M_{\text{ст}}$ , а также при грубой балансировке по  $M_{\text{д}}$  и  $\Delta G$ . При уменьшении глубины обратной связи жесткость МРП уменьшается, а чувствительность возрастает. Такой режим рационален при точной балансировке, когда требуется наибольшая точность измерений.

В качестве управляющего усилителя в данной схеме МРП была использована схема усилителя с управляемым коэффициентом усиления [2] (рис. 4), соединенная последовательно с усилителем мощности. Сигнал управления, снимаемый с измерительного сопротивления, предварительно детектируется (выпрямляется), фильтруется и усиливается до необходимого значения. Глубину обратной связи регулируют изменением управляющего напряжения, подаваемого на затвор транзистора  $VI$ .

#### Библиографический список

1. Гоцеридзе Р.М., Нитусов Ю.Е. Чувствительность резонансного электромагнитного грамометра при измерении разности действующих значений магнитных потоков и его жесткость // Тр. МВТУ. М., 1974. № 173. С. 80–88.
2. Хорвиц П., Хилл Ч. Искусство схемотехники. В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. Изд. 3-е стереотип. М.: Мир, 1986. 598 с.



УДК 621.9.06

**И.Б. Челпанов**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),  
**А.В. Кочетков**, д-р техн. наук, профессор (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО "Научно-исследовательский центр технического регулирования")  
E-mail: soni81@mail.ru

## Методы и средства создания нагружения и измерения параметров нагружения при испытаниях

*Рассмотрены методы и средства создания нагружения и измерения параметров нагружения при испытаниях. Показано, что в случаях когда нужно измерять полный комплекс сил и моментов, принцип измерения состоит в непосредственном измерении или малых перемещений, или деформаций, происходящих под действием всех составляющих сил и моментов.*

*It is shown, what in cases, when it is necessary to measure a full complex of forces and the moments, the measurement principle consists in direct measurement either small movings, or the deformations occurring under the influence of all making forces and the moments.*

**Ключевые слова:** метрология, испытания, робот, схема измерения, точность, качество, сертификация.

**Keywords:** metrology, test, robot, measurement scheme, accuracy, quality, certification.

### Введение

При механических испытаниях в большинстве случаев необходимо использовать те или иные средства задания внешних механических нагрузок: сил, моментов, давлений, причем они должны измеряться и/или регулироваться в соответствии с программой.

Приспособленная для задач испытаний различных технических средств многоаспектная классификация устройств нагружения представлена на рис. 1.

По *первому признаку* нагрузки по способу приложения делят на линейные, поверхностные и объемные. В любом случае они могут быть приведены к векторам силы и момента, но эти интегральные величины могут не быть показательными. Например, при равномерном объемном сжатии в жидкости суммарные сила и момент равны нулю.

По *второму признаку*, характеризующему относительный масштаб зоны приложения, нагрузки условно делят на локальные (чаще всего контактные, тогда

при определенных условиях их можно считать точечными), частичные (захватывающие только некоторые поверхности или их участки) и полные.

В соответствии с двумя этими признаками нагрузкам соответствуют различные расчетные модели: сосредоточенных или распределенных сил, давлений и моментов, с определенными законами распределений. Эти распределения бывают известными из законов физики (например, гидростатические давления), но чаще относительно них имеются только приближенные представления.

*Третий признак* – главный при выборе способов реализации испытательных стендов, – определяет способ приложения, происхождение и физическую природу прилагаемых нагрузок. Приложение может быть прямым, непосредственным (как поверхностное давление среды) или оно осуществляется с помощью специальных устройств с приводами. Исходными источниками могут быть сила тяжести, давление в замкнутых объемах или в потоках газа либо жидкости, силы электромагнитного или электростатического взаимодействия. Если нагружение осуществляют с помощью приводов, то используют те или иные передачи.

*Четвертый признак* характеризует важное свойство источника прилагаемых нагрузок и/или объекта, они могут быть неподвижными или подвижными. Можно привести типичные примеры относительного перемещения нагрузки и объекта: тележка с грузом перемещается по мосту, сила контактного взаимодействия (резания) приложена к вращающейся заготовке, зажатой в патроне станка.

*Пятый признак* определяет временные свойства нагрузок. На верхнем уровне нагрузки делятся на статические, постоянные во времени (но, возможно, задаваемые по последовательным этапам испытаний по ступеням) и динамические, изменяющиеся во времени по законам различного типа; они могут быть периодическими (чаще всего синусоидальными), нерегулярными с постоянными во времени свойствами, импульсными (ударными).



Рис. 1. Многоаспектная классификация устройства нагружения

В данном случае средства динамических испытаний могут иметь много общего с вибростендами, но они должны задавать не ускорения, а силы. Средства динамических испытаний на объемно-распределенные нагрузки, которые могут быть не только гравитационными, имеют свою собственную классификацию. Некоторые подходы применительно к случайным процессам в этом плане намечены в ГОСТ 25.101–83 "Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов".

При необходимости создания испытательных стендов выбор принципиальных и схемных решений требует подробной детализации и формулирования требований к ним по всем перечисленным и некоторым другим признакам. Однако при эксплуатационных испытаниях этого не требуется, испытательные воздействия при этом являются "естественными" и могут не требовать подробного анализа.

Основные возможные цели при испытаниях с механическим силовым нагружением часто могут быть такими:

- контроль прочности;
- определение предела прочности или предельно допустимого состояния по другим критериям;
- оценка остаточных деформаций и пр.

Непосредственное задание статических испытательных воздействий распределенными или сосредоточенными силами тяжести грузов используется при испытаниях на прочность различных натуральных стационарных объектов, зданий и их элементов (например, перекрытий), сооружений (например, мостов), подъемно-транспортного оборудования и пр.

Выбор масс грузов (это могут быть тонны, десятки и сотни тонн), способов и мест нагружения определяют нормативные документы. Во всех ответственных случаях под нагрузкой и после ее снятия измеряют перемещения и механические напряжения в опасных зонах напряженных элементов или в их соединениях.

При необходимости изменения составляющих непосредственно действующих на объект сил тяжести можно пойти по двум путям.

1. Наклонять объект, изменять его угловое положение относительно вертикали (рис. 2, а) и тем самым изменять составляющие силы тяжести по осям, связанным с объектом. Так, например, в диапазоне до  $1 g \approx 10 \text{ м/с}^2$  осуществляют градуировку и поверку линейного акселерометра, измеряющего составляющую ускорения силы тяжести по своей измерительной оси. Наклоном можно также испытывать макеты некоторых строительных конструкций.

2. При неизменном положении объекта на неподвижном основании использовать блоки или системы блоков; в частности, таким образом можно создавать момент или комбинацию силы и момента (рис. 2, б, в).

Серьезные технические трудности возникают тогда, когда необходимо создавать большие усилия в малых габаритах и объемах. В тех случаях, когда простые средства, требующие использования больших грузов, по тем или иным соображениям неприменимы, для создания больших сил используют домкраты, которые могут быть построены на винтовых переда-

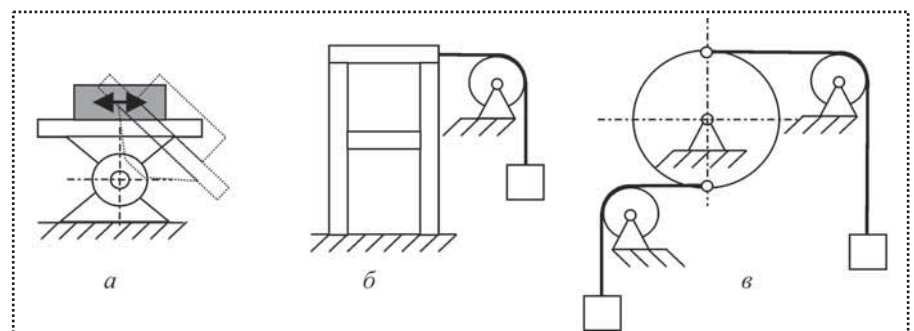


Рис. 2. Пути изменения составляющих сил тяжести, непосредственно действующих на объект

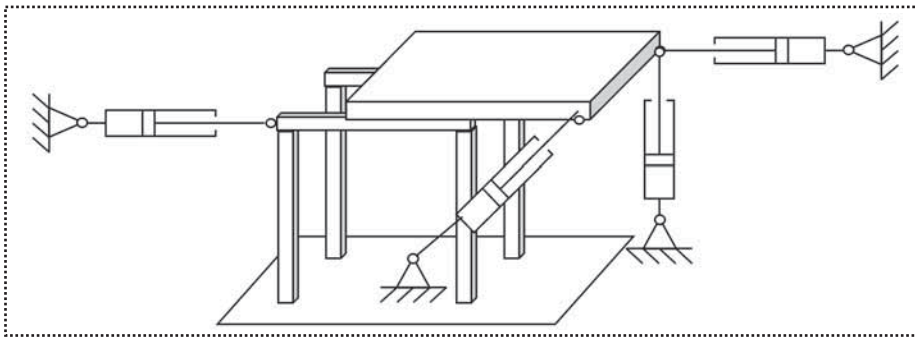


Рис. 3. Механизм параллельной структуры

чах (с ручным или электромеханическим приводом) или на гидроцилиндрах.

Гидравлические домкраты позволяют при наличии в нужном месте достаточно жесткой по всем направлениям прочной опоры создавать очень большие усилия, причем любых направлений, определяемых способом установки. При высоких давлениях рабочего тела (десятки мегапаскалей), обеспечиваемых гидростанцией, домкраты имеют малые габариты, создаваемое усилие приближенно определяется как произведение давления на площадь. Регулирование давления в рабочей полости домкратов осуществляется по обычным схемам.

Для нагружения крупногабаритных объектов часто используют не один, а целую систему домкратов. Иногда в одной или нескольких точках объекта в процессе ведения испытаний требуется задание сил различных направлений, тогда на основе нескольких гидроцилиндров создают механизм параллельной структуры (рис. 3). При группировании гидроцилиндров по ортогональным тройкам можно независимо изменять составляющие приложенных сил по разным направлениям – осям гидроцилиндров.

#### Отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных и преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими

Важным достоинством домкратов с гидроцилиндрами является возможность плавного и очень медленного изменения сил за счет изменения давления в рабочих полостях. Кроме того, разрушение объекта или даже элементов стенда в процессе испытаний с помощью гидравлических силовых устройств, как правило, не влечет катастрофических последствий, поэтому этот метод широко применяют в разрушающих испытаниях. Испытаниям с помощью именно гидравлических домкратов подвергают элементы мощной грузоподъемной техники. Стендовые разрушающие испы-

тания специального захватного устройства, предназначенного для подъема затонувшей подводной лодки "Курск", в свое время показывали по телевидению.

Устанавливаемые на гидроцилиндрах гидравлические вибростенды должны иметь золотники-распределители с высоким быстродействием.

Качественно более сложными в реализации являются задачи приложения к объектам испытательных усилий, переменных относительно

объекта по направлению (например, вращающихся относительно объекта). В этих случаях основным является путь, при котором силы сохраняют неизменное направление, а объект изменяет угловую ориентацию. Например, типовой стенд, предназначенный для испытаний образцов на усталостную прочность строится по схеме, представленной на рис. 4: образец в захватных устройствах вращается с постоянной угловой скоростью, а изгибающий момент создается силами тяжести грузов. При необходимости изменения цикла нагружения равномерное вращение может быть заменено угловыми колебаниями требуемой амплитуды. Вместо сил тяжести могут быть использованы бесконтактные силы магнитного взаимодействия, но они существенно ограничены, и зазор должен изменяться в узком диапазоне. Подобным образом можно испытывать значительно более сложные объекты, чем макеты или образцы материалов. При больших угловых скоростях и ускорениях становятся существенными силы инерции, и их нужно учитывать. Эти же силы инерции могут быть использованы как основные, нагружающие при задании более сложных движений, чем вращение вокруг неподвижной оси.

При испытаниях объектов ряда классов (например, передач, двигателей) необходимо создавать и измерять постоянные или (реже) переменные крутящие моменты на вращающихся валах. Они могут иметь

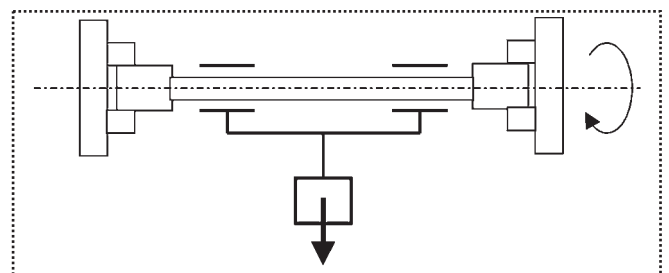


Рис. 4. Типовой стенд, предназначенный для испытаний образцов на усталостную прочность





смысл вращающих (активных) или тормозящих (пассивных) моментов.

Всестороннее равномерное со всех сторон давление, необходимое для контроля прочности и герметичности корпусов объектов (например, сосудов, предназначенных для работы на больших глубинах), создают в специальных гидравлических камерах, объемы которых могут достигать десятков кубических метров, а создаваемое внутри давление — сотен мегапаскалей.

Создание неравномерного (по заданным законам) нагружения по поверхностям при имитации воздействия, например, аэродинамических или гидродинамических нагрузок представляет серьезные трудности. Один из путей заключается в непосредственном воспроизведении при испытаниях физики процесса, к чему, например, стремятся при испытаниях в аэродинамических трубах, когда распределение давлений естественным образом получается при обтекании моделей с полным геометрическим подобием.

Однако при испытаниях больших натуральных объектов сохранение характера воздействий (непрерывное распределение по поверхности) исключено. Тогда приходится имитировать непрерывное распределение нагрузок системой сосредоточенных сил, имеющих иную природу. Обоснование условий эквивалентности (с определенной точностью) создаваемой системы сосредоточенных сил непрерывным нагрузкам в статических и динамических режимах является важным этапом расчетов. Отметим, что серьезной задачей конструктивной проработки испытаний в таких условиях является правильное соединение штоков гидроцилиндров с испытываемой конструкцией, чтобы исключить локальные зоны больших напряжений.

Нагрузки, распределенные по объему в реальных условиях эксплуатации, создаются, как правило, силами инерции при неравномерном и непоступательном движении объекта. При испытаниях, имитирующих реальные условия, эти же силы инерции, точнее, законы распределения нагрузок по объемам, тоже нужно было бы создавать за счет такой же неравномерности и непрямолинейности движений объекта испытаний. Но с определенной точностью реальные законы движения (в первую очередь, линейные, с большими перемещениями) стараются заменять другими, более приспособленными для реализации (в первую очередь, вращением на центрифугах). При этом бывает так, что получающееся линейное центральное поле центростремительных ускорений не является подходящим. Этим обоснованы поиски возможностей применения механизмов более сложных, чем центрифуги, для испытаний на объемно распределенные переменные нагрузки.

Отметим теперь специфику измерений параметров силовых взаимодействий при испытаниях. Как отмечалось ранее, способы измерения внешних прикладываемых сил (сил тяжести от грузов, усилий домкратов и пр.) очевидны. Основные трудности имеют место, когда подлежащие измерению силы и моменты являются для конструкции внутренними. Это силы и моменты взаимодействия деталей в их соединениях и напряжения в сечениях.

### Схемы размещения средств измерения

Средства измерения сил и моментов могут быть встроенными и пристроенными. Принципы их размещения показаны на рис. 5.

В первом случае (рис. 5, а) встроенный датчик вставлен в разрыв конструкции так, что через него передается усилие (в данном случае — сжатия, может быть растяжения, но не моменты и силы других направлений) и представляет собой динамометр — самостоятельный серийный силоизмерительный прибор, который непосредственно измеряет силу.

В данной схеме он выполняет роль конструктивного элемента, передающего усилие. Как конструктивный элемент он должен быть жестким и прочным.

Во втором случае (рис. 5, б) датчик измеряет малое перемещение фланцев средней части друг относительно друга, происходящее вследствие упругого сжатия центральной части (которая представляет собой обычный элемент конструкции), под действием сил. Это перемещение обратно пропорционально жесткости этого элемента, и поэтому этот элемент, являясь составной частью самой конструкции, как бы входит в состав силоизмерительного устройства в качестве упругого элемента, на котором собственно и происходит измерение. Чем этот элемент жестче, тем, возможно, лучше для самой несущей конструкции, но при этом будет меньше коэффициент преобразования. Пристраивание датчика не требует разборки изделия, его возможная поломка никак не сказывается на работоспособности конструкции в целом.

Вместо датчика малых перемещений во втором случае могут быть использованы тензометры сопротивления (тензорезисторы), наклеиваемые на поверхности и непосредственно измеряющие именно деформации, а не напряжения. В качестве основы для

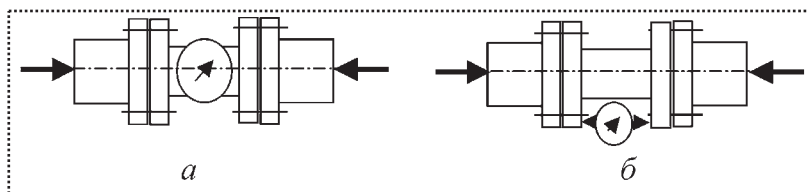


Рис. 5. Схемы размещения встроенных (а) и пристроенных (б) средств измерения



датчика малых перемещений можно использовать различные детали: крепежные, корпусные, прокладки и пр.

### Обсуждение полученных результатов, рекомендации

Для повышения чувствительности можно использовать такие приемы, как замена исходных материалов деталей на другие, имеющие меньший модуль Юнга, уменьшение сечений, выполнение выточек и даже изменения внешних форм. При этом, конечно, нужно сохранять определенные запасы прочности. В качестве примера можно привести прием высверливания продольных отверстий в болтах или винтах с последующим наклеиванием тензорезисторов изнутри. Если крепление осуществляют с помощью нескольких болтов, датчик можно размещать только в одном из них. Важно, чтобы при изменении приложенных сил происходили достаточно большие, измеряемые деформации. При значительной начальной затяжке болтов это условие не выполняется.

В более сложных случаях, когда нужно измерять полный комплекс (силы и моменты), принцип измерения заключается в непосредственном измерении или малых перемещений, или деформаций, происходящих под действием всех составляющих сил и моментов. Существуют и серийно выпускаются многокомпонентные датчики сил и моментов. В определенном смысле универсальными являются шестикомпонентные встраиваемые датчики, по выходным сигналам которых определяют три составляющие вектора силы и три составляющие вектора момента. Такие шестикомпонентные датчики с элементами растяжения-сжатия часто строят по схеме параллельной структуры типа платформы Стюарта.

Многокомпонентные силоизмерительные средства используют не обязательно в компактном исполнении, их можно компоновать по элементам, пристраивая к испытываемому объекту по одному однокомпонентному датчику, каждый из которых измеряет только перемещение по своей оси. Подобного рода многокомпонентные силоизмерительные устройства, встроенные или пристроенные датчики сил и моментов, могут быть штатными, и тогда их выходные сигналы используются в системах автоматического

управления. Встроенные датчики силомоментного очувствления используются в захватных устройствах некоторых специализированных промышленных роботов.

При измерении составляющих сил и моментов могут ставить различные цели. Во-первых, могут представлять интерес силы взаимодействия рабочего органа технологического робота с предметом производства. Так, при операциях сборки и шлифования поверхностей правильность выполнения контролируют по силам взаимодействия соответственно подвижной детали или шлифовального круга с неподвижно установленной деталью или заготовкой. Измерение сил взаимодействия часто необходимо не только при испытаниях и наладке, но и в режиме нормальной работы (тогда сигналы датчиков используют в системах контроля и управления). Во-вторых, необходимо измерение составляющих сил и моментов в подвижных соединениях звеньев механизма манипулятора и в сечениях наиболее напряженных элементов. Это делают обычно при исследовательских испытаниях, в частности, для анализа запасов прочности конструкции. В-третьих, может оказаться необходимым измерение усилий захватного устройства, а также предельно допустимых сил, при которых захватное устройство еще может удерживать переносимый объект. В некоторых случаях именно эти значения сил определяют грузоподъемность.

### Вывод

*Многокомпонентные датчики сил и моментов могут представлять собой самостоятельные приборы. При необходимости встраивания в механизмы их обычно предпочитают компоновать в составе разъемных соединений. Для этого должны быть согласованы их присоединительные размеры.*

### Библиографический список

1. Колпашников С.Н., Тимофеев А.В., Челпанов И.Б. Стандартизация промышленных роботов. М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. Кочетков А.В. Динамика промышленных роботов / И.Б. Челпанов, Б.М. Бржозовский, А.В. Кочетков. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. 132 с.



УДК 621.9.06 (075.8)

**А.А. Фомин**, канд. техн. наук (Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)  
E-mail: fomin1@mail.ru

## Обеспечение микрогеометрии поверхностей при обработке заготовок с неоднородными свойствами

*Рассмотрено влияние глубины резания, рабочей подачи, частоты вращения и числа зубьев инструмента на шероховатость обработанной поверхности заготовки. Разработаны рекомендации по обеспечению минимальной шероховатости поверхностей.*

*Cutting depth influence, working feed, rotation frequency and tool teeth quantity on a slab processed surface roughness is considered. Recommendations about maintenance of the minimum surfaces roughness are developed.*

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, механическая обработка, заготовка, многофакторный эксперимент.

**Keywords:** surface roughness, machining, slab, multifactorial experiment.

Процесс механической обработки заготовок с неоднородными свойствами, например горбыля, является многофакторным и многопараметрическим. Однако в начальной стадии исследований целесообразно провести однофакторные отсеивающие эксперименты, что позволит определить условия работы технологической системы, при которых процесс механической обработки протекает устойчиво, с минимальным уровнем вибрации.

Проведенные однофакторные экспериментальные исследования позволили выбрать схему встречного фрезерования горбыля, которая обеспечивает прижатие шпиндельного узла с фрезой силой резания к охватываемой направляющей, предназначенной для установочных перемещений и позиционирования режущего инструмента относительно рабочей поверхности стола.

После экспериментального обоснования рациональных условий фрезерования горбыля, характеризующегося неоднородными свойствами обрабатываемого материала, следует установить математические модели геометрических показателей обработанных поверхностей в функции независимых факторов, что позволит управлять процессом обработки для получения желаемой геометрии обработанного изделия.

В качестве независимых факторов выбраны: глубина резания  $t$ , мм ( $x_1$ ), скорость рабочей подачи заготовки  $S_x$ , м/мин ( $x_2$ ), частота вращения  $n$ , мин<sup>-1</sup> ( $x_3$ ) и число зубьев фрезы  $Z$ , шт. ( $x_4$ ). Реализовали полный факторный эксперимент, план которого  $N = 2^4 = 16$ . В качестве параметра оптимизации выбрано среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , которое измеряли прибором "Surtronic 3" фирмы Rank Taylor Hobson.

Априори постулируемую математическую модель, связывающую параметр оптимизации с независимыми факторами, отыскивали в виде

$$Y_i = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где  $Y_i$  – рассматриваемый параметр оптимизации, измеренный после окончания обработки заготовки;

$b_0, b_i, b_{ij}$  – коэффициенты регрессии, подлежащие определению;

$x_i$  – независимые факторы в кодовом обозначении;

$x_i x_j$  – эффекты взаимодействия.

В развернутом виде выражение (1) представляется как

$$Y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4. \quad (2)$$

Реализовали матрицу центрального композиционного планирования:

$$abcd \ bcd \ acd \ cd \ abd \ bd \ ad \ d \ abc \ bc \ ac \ c \ ab \ b \ a \ (-1). \quad (3)$$

Каждая буква строки (3) означает верхний уровень фактора, буквы, находящиеся в одной группе – одну строку матрицы планирования, а (-1) означает выполнение опыта на нижнем уровне всех независимых факторов.

Численные значения верхнего, нижнего и основного уровней независимых факторов назначены исходя из технической характеристики станка для обработки горбыля, а также результатов проведенных однофакторных экспериментов. Значения уровней независимых факторов приведены в таблице.

После проведения опытов и измерения шероховатости поверхности был получен параметр оптимизации



**Значения независимых факторов  
и средние значения  
параметра оптимизации**

| Номер опыта | Фактор   |             |                         |           | Параметр оптимизации |
|-------------|----------|-------------|-------------------------|-----------|----------------------|
|             | $t$ , мм | $S$ , м/мин | $n$ , мин <sup>-1</sup> | $Z$ , шт. |                      |
| 1           | 8        | 30          | 4880                    | 6         | 90                   |
| 2           | 4        | 30          |                         |           | 70                   |
| 3           | 8        | 10          |                         |           | 50                   |
| 4           | 4        | 10          |                         |           | 30                   |
| 5           | 8        | 30          | 2880                    | 6         | 95                   |
| 6           | 4        | 30          |                         |           | 75                   |
| 7           | 8        | 10          |                         |           | 75                   |
| 8           | 4        | 10          |                         |           | 45                   |
| 9           | 8        | 30          | 4880                    | 2         | 95                   |
| 10          | 4        | 30          |                         |           | 75                   |
| 11          | 8        | 10          |                         |           | 85                   |
| 12          | 4        | 10          |                         |           | 55                   |
| 13          | 8        | 30          | 2880                    | 2         | 100                  |
| 14          | 4        | 30          |                         |           | 90                   |
| 15          | 8        | 10          |                         |           | 80                   |
| 16          | 4        | 10          |                         |           | 55                   |

ции, который представлен последним столбцом таблицы. После статистической обработки данных таблицы получено уравнение регрессии, связывающее среднее арифметическое отклонение параметра  $Ra$  с элементами режима резания:

$$Y_{Ra} = 72,6 + 10,9 x_1 + 13,4 x_2 - 4,1 x_3 - 6,6 x_4, \quad (4)$$

где  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – кодовые обозначения соответственно глубины резания  $t$ , рабочей подачи  $S$  заготовки, частоты вращения  $n$  и числа зубьев  $Z$  фрезы.

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = 32$  табличное значение критерия Стьюдента  $t_{\text{табл}} = 2,04$ , а дисперсия коэффициентов регрессии  $S^2(b_i) = 3,65$ . Доверительные интервалы  $\Delta b_i = \pm t_{\text{табл}} S(b_i) = 2,04 \cdot 1,91 = \pm 3,9$ . Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия,  $b_{12} = b_{34} = -2,19$ ;  $b_{13} = b_{14} = b_{23} = 0,31$ ;  $b_{24} = -2,81$  по модулю меньше доверительного интервала  $\Delta b_i$ , вследствие чего они являются незначимыми и в уравнении (4) отсутствуют.

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 0,84$ , а табличное  $F_{\text{табл}} = 2,5$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , степенях свободы  $f_1 = 11$  и  $f_2 = 32$ , поэтому уравнение (4) является адекватным.

Выполнив переход от уравнения (4) к уравнению регрессии в натуральном выражении факторов, получим

$$Ra = 42,0 + 5,47 t + 1,34 S_x - 4,1 \cdot 10^{-3} n - 3,28 Z. \quad (5)$$

С использованием программных продуктов "Статистика 6" и Excel получены уравнения регрессии и построены 2D-графики зависимостей среднего арифметического отклонения параметра  $Ra$  обработанных поверхностей от глубины резания, подачи, частоты вращения и числе зубьев фрезы (рис. 1,  $a-z$ ).

Как следует из многофакторной модели шероховатости (4) и рис. 1,  $a, б$  наибольшее влияние на параметр шероховатости  $Ra$  оказывает скорость продольной подачи заготовки, затем по степени влияния следует глубина резания, с увеличением которых шероховатость обработанных поверхностей возрастает. С увеличением частоты вращения и числа зубьев фрезы параметр шероховатости  $Ra$  уменьшается (рис. 1,  $в, з$ ), что объясняется уменьшением шага точек пересечения соседних резов, наносимых зубьями фрезы на заготовку и снижением силовой нагрузки на каждый зуб фрезы.

Прямые, представленные на рис. 1, описываются соответствующими уравнениями регрессии:

$$Ra = 40,0 + 5,47 t \quad (\text{рис. 1, } a); \quad (6)$$

$$Ra = 45,94 + 1,34 S_x \quad (\text{рис. 1, } б); \quad (7)$$

$$Ra = 88,58 - 4,1 \cdot 10^{-3} n \quad (\text{рис. 1, } в); \quad (8)$$

$$Ra = 85,94 - 3,28 Z \quad (\text{рис. 1, } з). \quad (9)$$

С использованием программного продукта "Статистика 6,0" построены также 3D XYZ-графики и 3D XYZконтур-графики интерактивного влияния независимых факторов на среднее арифметическое отклонение профиля (рис. 2,  $a-в$ ).

Уравнение регрессии, описывающее интерактивное влияние глубины резания  $t$  и скорости продольной подачи заготовки  $S_x$ , имеет вид:

$$Ra = 13,13 + 5,47 t + 1,34 S_x. \quad (10)$$

Интерактивное влияние скорости продольной подачи заготовки  $S_x$  и частоты вращения  $n$  режущего инструмента представляется выражением

$$Ra = 61,7 + 1,34 S_x - 4,1 \cdot 10^{-3} n, \quad (11)$$

а интерактивное влияние числа зубьев и частоты вращения фрезы – уравнением:

$$Ra = 53,13 - 3,28 Z + 5,47 t. \quad (12)$$

Наклонные плоскости графиков содержат области с различной штриховкой, которая соответствует конкретному численному значению среднего арифметического отклонения параметра  $Ra$ , указанному справа от графика в виде цифр, стоящих рядом с каждым прямо-

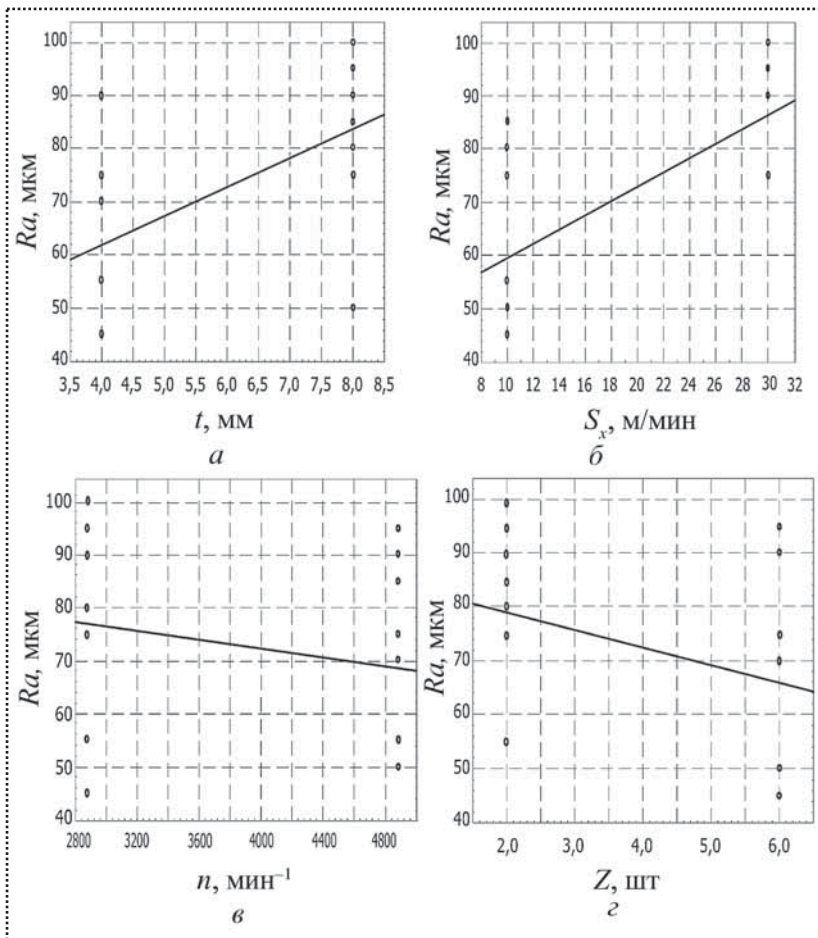


Рис. 1. Среднее арифметическое отклонение параметра  $Ra$  в функции:

$a$  – глубины резания;  $b$  – рабочей подачи заготовки;  $c$  – частоты вращения фрезы;  $d$  – числа зубьев фрезы

На основании 3D  $XYZ$  контур-графиков можно определить оптимальный режим фрезерования горбыля, обеспечивающий требуемую микрогеометрию обработанной поверхности, и максимальную производительность процесса обработки.

По известному параметру шероховатости поверхности, который необходимо получить после фрезерования горбыля (численное значение  $Ra$  берем из чертежа детали), выбираем прямую линию, соответствующую этой шероховатости. Двигаясь по выбранной прямой или параллельной прямой аналогичного типа, перебираем элементы режима фрезерования (например, глубину и подачу), которые могут обеспечить требуемую шероховатость, например, при наибольшей рабочей подаче заготовки. Максимальная рабочая подача обеспечит минимальное машинное время фрезерования, а следовательно, максимальную производительность процесса обработки. Можно построить 3D  $XYZ$ -контур-графики для других сочетаний независимых факторов, что позволяет оптимизировать процесс фрезерования для различных условий механической обработки горбыля и обеспечить требуемую шероховатость поверхностей готового изделия.

угольником. Сравнивая штриховку какого-либо прямоугольника, изображенного справа от рисунка и найдя аналогичную штриховку на наклонной плоскости, можно оценить интерактивное влияние интересующих нас независимых факторов.

Сравнивая штриховку какого-либо прямоугольника, изображенного справа от рисунка и найдя аналогичную штриховку на наклонной плоскости, можно оценить интерактивное влияние интересующих нас независимых факторов.

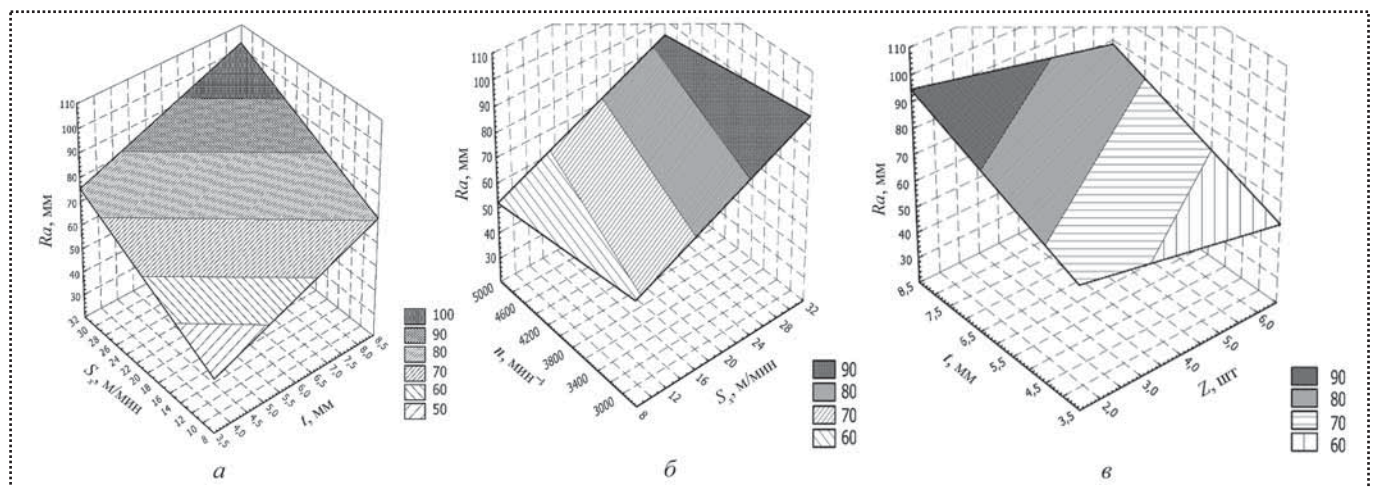


Рис. 2. 3D  $XYZ$ -график интерактивного влияния на среднее арифметическое отклонение параметра  $Ra$ :

$a$  – глубины резания  $t$  и рабочей подачи заготовки  $S_x$ ;  $b$  – рабочей подачи заготовки  $S_x$  и частоты вращения  $n$  фрезы;  $c$  – числа зубьев  $Z$  фрезы и глубины резания  $t$

# СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 621.744.37

**С.А. Микаева**, д-р техн. наук, **Ю.П. Петренко**, канд. техн. наук, **А.С. Микаева**, инженер (Московский государственный университет приборостроения и информатики),

**О.Е. Железникова**, **Л.В. Сеницына**, канд-ты техн. наук

(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск)

E-mail: mikaeva@pechkin.npo.lit.ru

## Металлокерамический припой

*Рассмотрены керамические припои, предназначенные для пайки металлов с керамикой. Предложен новый состав металлокерамического припоя. Даны рекомендации по его применению для натриевых ламп высокого давления.*

*Considered ceramic alloys designed for soldering with ceramics. The new composition of the cermet solder. The recommendations for its use for high pressure sodium lamps.*

**Ключевые слова:** металлокерамический припой, сплав, состав, температура.

**Keywords:** metal-ceramic solder, alloy, composition, temperature.

Известен металлокерамический припой (МКП), состоящий из окислов кальция, циркония, алюминия и магния, предназначенный для пайки металла с керамикой, работающий при относительно низких температурах и имеющий небольшой срок службы. Однако такой спай не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к металлокерамическим узлам горелок натриевых ламп высокого давления (НЛВД) из-за недостаточной термостойкости.

Наиболее близким к предлагаемому решению является следующий состав – прототип, % мас.: оксид кальция 10...15; оксид циркония 1...5; оксид ниобия 5...25; оксид вольфрама 7...15; оксид магния 15...17; ниобий 2...3; оксид алюминия – остальное. Этот состав применяли в стандартных горелках НЛВД, выпускаемых опытным производством специального конструкторско-технологического бюро (г. Полтава) в 1974–1990 гг. Но для появившихся позже НЛВД с улучшенной цветопередачей подобные спаи не обеспечивали требуемых характеристик и особенно – в части продолжительности горения, так как одним из способов улучшения цветопередающих свойств НЛВД является повышение давления паров натрия и ртути, а создать в горелке подобные условия можно,

лишь повысив электрическую нагрузку, т.е. мощность, перегрузив лампу, а соответственно и металлокерамический спай. При этом температура спая резко повышается, давление в горелке возрастает и у стандартных НЛВД срок службы резко снижается из-за появления продольных микротрещин в спае и т.п.

Для повышения адгезионной способности спая, состоящего из поликора и титана или ниобия, в состав МКП необходимо ввести дополнительно титан и вольфрам. Вольфрам повышает термостойкость МКП. Такой МКП будет работать при большей температуре с улучшенной адгезией и к металлу, и к керамике. Однако количество вводимой добавки теоретически рассчитать невозможно, и эти значения определялись экспериментально [1–3].

Авторами были проведены испытания стандартных поликоровых горелок с ниобиевыми вводами и вольфрамовыми активированными электродами, по геометрии и наполнению соответствующих горелкам ламп ДНаТ 400. Герметизацию горелок – спая поликора и ниобия осуществляли составами МКП, приведенными в таблице. Испытуемые горелки включали в стандартную схему с дросселем и интегральным зажигающим устройством (ИЗУ), а лабораторным автотрансформатором изменяли питающее напряжение, т.е. потребляемую мощность. К спаю присоединяли термопару ВР20 с соответствующим прибором, показывающим температуру спая. Горелку помещали в вакуумный шкаф с целью исключения разгерметизации на воздухе, вакуум обеспечивался насосом 2НВР-5Д. Мощность, подаваемая на горелку, менялась ступенчато от 400 Вт через 50 Вт, с выдержкой 30 мин. Погасание горелки без повторного зажигания через 1 ч считалось критерием разгерметизации спая (при ее работе фиксировалась температура спая). Для исключения случайных процессов каждого состава МКП было изготовлено от трех до пяти горелок. Для получения полной картины в эксперименте авторами была также использована стандартная горелка ДНаТ 400 производства Всероссийского научно-исследовательского института источников света им. А.Н. Лодыгина (ВНИИИС, г. Саранск).



### Температура разгерметизации спаев

| Горелка                      | ДНаТ 400 | Состав МКП |     |      |                  |
|------------------------------|----------|------------|-----|------|------------------|
|                              |          | Прототип   | 1-й | 2-й  | 3-й              |
| 1-я                          | 864      | 903        | 925 | 970  | Отгорел токоввод |
| 2-я                          |          |            | 990 | 995  | 970              |
| 3-я                          |          |            | 972 | 1035 | 970              |
| 4-я                          |          |            | —   | 1008 | 890              |
| Среднее значение температуры | 864      | 903        | 962 | 992  | 943              |

Составы МКП в % мас.:

- **прототип:** оксиды – кальция 10, циркония 5, ниобия 20, вольфрама 10, магния 15, ниобия 3, алюминия 37;
- **1-й состав:** оксиды – алюминия 40, кальция 18, магния 12, вольфрама 8, ниобия 7, циркония 3, ниобия 3, титана 5, вольфрама 4;
- **2-й состав:** оксиды – алюминия 45, кальция 17, магния 11, вольфрама 7, ниобия 7, циркония 3, ниобия 2, титана 4,5, вольфрама 3,5;
- **3-й состав:** оксиды – алюминия 50, кальция 16, магния 10, вольфрама 7, ниобия 6, циркония 2, ниобия 2, титана 4, вольфрама 3.

Температуры разгерметизации спаев для экспериментальных горелок приведены в таблице. Сравнительный анализ результатов испытаний свидетельствует о том, что применение предлагаемого авторами состава МКП позволяет повысить рабочую температуру спая с сохранением его вакуумной плотности не менее чем на 40 °С по сравнению с прототипом. Из таблицы следует, что правильный выбор состава МКП может повысить значение рабочей температуры спая более чем на 100 °С.

Целью работы являлось повышение термической и адгезионной способности спая. Указанная цель достигается тем, что МКП имеет следующий состав, в % мас.: оксиды – алюминия 40...50; кальция 16...18; магния 10...12; вольфрама 7...8; ниобия 6...7; циркония 2...3; ниобия 2...3; титана 4...5; вольфрама 3...4.

Данный МКП способен обеспечить длительность работы НЛВД с повышенной удельной электрической нагрузкой до 12 000 ч, а также существенно повысить качество выпускаемых ламп и значительно расширить их практическое применение.

### Библиографический список

1. **Микаева С.А.** Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. М.: Научтехлитиздат, 2004. 210 с.
2. **Микаева С.А.** Технология производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем. В 2-х частях. Ч. I. М.: МГУПИ, 2009. 210 с.
3. **Микаева С.А.** Технология производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем. В 2-х частях. Ч. II. М.: МГУПИ, 2010. 175 с.



УДК 621.791.048

**В.В. Карабанов**, канд. техн. наук, **И.О. Бохоров**, инженер  
Тел.: 8 (498) 520-34-72

## Пайка высоколегированных сталей и сплавов

*Рассмотрены составы и структура коррозионно-стойких, жаростойких, жаропрочных сталей и жаропрочных литейных никелевых сплавов. Приведены паяльные материалы, припои и технологии их пайки. Приведены условия получения паяных соединений, равнозначных с паяемым металлом.*

*Structures and structure corrosion-resistant, heat resisting, heat resisting staly and heat resisting foundry nickel alloys are considered. Soldering materials, solders and technologies of their soldering are given. Conditions of receiving payany connections, equivalent with soldered metal are given.*

**Ключевые слова:** высоколегированная сталь, легирующий элемент, аустенитная структура, литейный жаропрочный никелевый сплав.

**Keywords:** high-alloyed became, alloying element, austenitny structure, foundry heat resisting nickel alloy.

Современный процесс технического развития основан на применении высоколегированных сталей и сплавов, отвечающих постоянно усложняющимся требованиям к условиям эксплуатации технических конструкций. В соответствии с назначением высоколегированные стали можно разделить на следующие группы:

- коррозионно-стойкие при обычных и повышенных температурах;
- коррозионно-стойкие при высоких температурах эксплуатации (до 600 °С);
- жаропрочные, работоспособные при температурах до 1100 °С и выше [1, 2].

Как правило, жаропрочные стали являются и жаростойкими (12X18H10T, 20X20H14C2).

В условиях коррозионной активности сред и их высоких температур применяют стали с более сложным составом и структурой, что требует для их пайки применения более сложных по составу припоев.

Специальную группу конструкционных материалов представляют жаропрочные литейные никелевые сплавы, применяемые при температурах, превышающих 1100 °С и не подлежащие сварке [3].

Прочность сталей зависит в основном от степени их легирования и структуры. При температурах эксплуатации прочность жаропрочных сталей, как пра-

вило, снижается и может составлять 0,3...0,7 от прочности при обычных температурах.

Коррозионно-стойкими обычно называют стали с высоким содержанием хрома (13...19 %) и других легирующих элементов. Наиболее широкое применение находят коррозионно-стойкие стали аустенитного класса, например, хромоникелевые аустенитные стали, содержащие значительное количество хрома и никеля. При более высоком содержании хрома и никеля стали становятся жаропрочными и жаростойкими. Необходимую жаропрочность и жаростойкость сталей обеспечивают путем сложного легирования или структурных изменений металла. Содержание легирующих элементов в этих сталях колеблется в широких пределах (Cr – от 8 до 22 %, Co – до 20, Mo – до 0,1, W – до 11, Ti – до 4, Al – до 6, Si – от 0,3 до 1 %). При этом содержание железа может составлять до 50, углерода – до 0,2 %. Суммарное содержание алюминия и титана в этих сталях не превышает 8 %.

Жаропрочности сталей достигают не только путем их легирования, но и дополнительным карбидным и интерметаллидным упрочнением. Повышению жаропрочности сталей способствует также специальная термообработка. Жаро- и окислостойкие стали обладают высокой стойкостью против химического разрушения в газовых средах при температурах выше 500 °С, они работоспособны в ненагруженном и слабонагруженном состояниях. В них уникально сочетаются прочность, пластичность и высокая вязкость, что делает их незаменимыми при использовании в тяжело нагруженных элементах конструкции криогенной авиационной и ракетно-космической техники.

Коррозионно-стойкие, жаропрочные и жаростойкие стали на основе железа, никеля и хрома относят к одному из важнейших классов специальных конструкционных материалов, используемых в большинстве важнейших отраслей промышленности. Они обладают комплексом свойств, принципиально отличающих их от свойств обычных углеродистых низко- и среднелегированных сталей.

Важнейшей структурной составляющей рассматриваемых сталей является твердый раствор хрома и никеля в железе. Вводимые в стали легирующие элементы образуют с основой твердые растворы и изменяют свойства и структуру стали, которая определяется содержанием в ней ферритообразующих (Si, Mo,





Ti, Al, Nb, W) и аустенитообразующих элементов (Co, Cu, V).

Наиболее благоприятной для высоколегированных сталей и сплавов является аустенитная структура. Аустенит обладает высокими пластическими свойствами, значительно превышающими пластичность феррита. Добавление в сталь аустенитообразующего элемента позволяет расширить область существования аустенита и сохранить его до комнатной температуры и ниже при термических режимах обработки. При разработке режимов пайки аустенитных сталей необходимо стремиться сохранить структуру аустенита паяемых сталей и сплавов и связанные с аустенитом ценные свойства металла: высокое сопротивление коррозии, высокую пластичность и т.д.

Никель наиболее существенно стабилизирует аустенит, расширяет температурную и концентрационную области его существования, снижает критическую скорость при закалке. Содержание в сталях одновременно большого количества никеля и хрома снижает критическую скорость охлаждения настолько, что аустенитное состояние сталей сохраняется ниже комнатной температуры.

Установлено, что содержание в стали никеля свыше 6 % наряду с хромом резко облагораживает электрический потенциал, а одновременное присутствие свыше 12 % хрома способствует проявлению защитных свойств оксидной пленки, образующейся на поверхности металла. Хром и алюминий образуют плотные, термодинамически устойчивые оксидные пленки, обеспечивающие жаропрочность сталей. Наиболее эффективно антикоррозионные свойства проявляются в известных коррозионно-стойких сталях 2X18N9, X18N9 и др.

Высокое содержание хрома и никеля в аустенитных сталях делает их стойкими против химической и электрохимической коррозии. Аустенитные хромоникелевые стали являются наиболее распространенной группой коррозионно-стойких сталей. Фазовая и структурная однородность, а также однородность по химическому составу определяют электрохимическую однородность сталей.

В высоколегированных аустенитных сталях может быть достигнуто сочетание особых свойств: коррозионной стойкости и жаропрочности. Для достижения таких свойств их обычно легируют упрочняющими элементами – молибденом и вольфрамом (до 7 % каждого). Важной добавкой является бор. Такие стали широко применяют в энергетическом машиностроении, при изготовлении объектов, эксплуатируемых при температурах выше 750 °С. При легировании сталей ванадием и алюминием достигается высокая окислительная стойкость сталей. Легирование стали кремнием способствует созданию прочных и плотных оксидов

на поверхности металла. Жаростойкие стали обладают высокой стойкостью против химического разрушения при температурах до 1150 °С.

Хромоникелевые стали аустенитного класса широко применяют в качестве коррозионно-стойких (12X18A10 и др.). Содержание 18 % хрома обеспечивает стали высокую коррозионную стойкость в окислительных средах, а также жаростойкость и жаропрочность при умеренных температурах. Наличие 9...12 % никеля способствует получению аустенитной структуры в стали, характеризующейся высокой технологической прочностью в газовых и химически активных средах и хладостойкостью.

Температурные режимы сварки приводят к полному разрушению исходной структуры металлов, а активное взаимодействие его с окружающей средой – к физической и химической неоднородности. Возникающие в соединении внутренние напряжения при охлаждении создают потенциальную возможность для образования горячих трещин в околошовной зоне шва.

При пайке жаростойких и жаропрочных сталей обеспечиваются наиболее благоприятные условия для сохранения их исходной структуры и свойств в нагреваемой области и получения соединений, равнопрочных с паяемым металлом.

В процессе пайки необходимо обеспечить надежный контакт расплава припоя с чистой поверхностью паяемого металла. Однако термодинамически устойчивые оксидные пленки, образуемые на поверхности высоколегированных сталей и обеспечивающие ей высокую коррозионную стойкость и жаростойкость, препятствуют возникновению контакта расплава припоя с паяемым металлом.

Образование оксидной пленки на высоколегированных сталях при пайке происходит путем избирательного окисления тех компонентов стали или сплава, которые имеют большее сродство с кислородом. Эти элементы активно диффундируют к поверхности и окисляются, достигая ее. При этом происходит обеднение ими поверхностного слоя паяемого металла. Так при нагреве стали 1X18N9T поверхностный слой обедняется хромом до 8 %, что приводит к резкому снижению коррозионной стойкости стали. При обеднении поверхностного слоя стали хромом, титаном и алюминием снижается ее жаропрочность.

В зависимости от температуры и времени нагрева состав оксидной пленки изменяется и по толщине пленки [4].

Высоколегированные стали содержат такие легирующие элементы, как алюминий, титан, марганец, ниобий и др., обладающие большим сродством к кислороду, а образование их оксидов в пленке препятствует смачиванию поверхности стали припоем, что



затрудняет протекание процесса пайки. Марганец, ванадий и другие элементы, подавляющие диффузионную подвижность атомов, обеспечивают высокую температуру рекристаллизации жаропрочных сталей.

За нижний предел температуры пайки принимают температуру начала развития процессов рекристаллизации и диффузии, которая близка к 1100 °С. За верхний предел принимают температуру разупрочнения стали. С повышением температуры нагрева происходит резкое падение пластичности стали, особенно при достижении температуры 1200 °С.

Трудности получения высококачественного паяного соединения заключаются в удалении образуемых при нагреве устойчивых оксидных пленок. Их удаляют с помощью твердых и газообразных флюсов, восстановительных сред, нейтральных газов, вакуума, а также путем применения самофлюсующих припоев.

При пайке на воздухе токами высокой частоты — ТВЧ или в пламени горелки применяют активные твердые боратные флюсы ПВ200, ПВ201, ПВ209, ПВ284Х. Удаление оксидных пленок в этом случае происходит путем их растворения в расплаве флюса и химического взаимодействия с компонентом флюса. В результате их взаимодействия происходит образование соединения, растворимого во флюсе, или оно шлакуется на поверхности флюса. В результате химического взаимодействия компонентов флюса с паяемой сталью происходит отслаивание оксидной пленки от поверхности стали.

Флюсы содержат специальную лигатуру для активизации процесса восстановления оксидов в процессе флюсования. Процесс удаления оксидных пленок с данных сталей может иметь длительный период, в течение которого флюсовое покрытие может испаряться и разрушаться с обнажением поверхности стали. В этом случае пайку проводят в защитной среде или, при пайке на воздухе, на участок пайки в процессе нагрева наносят дополнительное количество флюса.

При нагреве боратных флюсов образуется борный ангидрид, который плохо растворяет оксиды хрома, кремния, алюминия. Поэтому при их больших содержаниях флюсы применяют с добавками тетраборатов и фторидов.

При пайке никелевых сталей (Х20Н8Т) в печах (с медленным нагревом) боратные флюсы непригодны, так как происходит образование легкоплавких эвтектик вследствие насыщения паяемых сталей бором. В вакууме такие оксидные пленки также не диссоциируют. Поэтому при пайке рекомендуют использовать вещества, восстанавливающие металл из указанных оксидов и образующие газообразные продукты взаимодействия. К таким веществам относят хлористый и фтористый аммоний. Последний, в процессе нагрева, разлагается с образованием азота, водоро-

да и фтористого водорода. Удаление оксидов обусловлено восстанавливающим действием водорода и образованием фторидов алюминия, кремния, титана и других элементов [4].

При пайке в вакууме может происходить обезуглероживание стали. В вакууме активность углерода значительно возрастает. Восстанавливая металл, углерод окисляется до окиси углерода, которая легко удаляется.

При пайке в печах и в пламени горелки находят эффективное применение газообразные флюсы, образуемые при разложении фтористого аммония и фторбората аммония. Первый разлагается на водород и фтористый водород, второй продукт при 800...900 °С разлагается на азот, водород, фтористый водород (HF) и бор. Наилучшим флюсующим свойством обладает трехфтористый бор (BF<sub>3</sub>), который обычно поставляют в баллонах в сжатом состоянии. При использовании газообразных флюсов температура пайки ниже, чем при твердых флюсах, но они ядовиты и требуют осторожного обращения.

В водороде и в диссоциированном аммиаке оксиды высоколегированных сталей восстанавливаются плохо. С целью безопасности процесса пайки лучше использовать азотно-водородную смесь в соотношении 7:20, которая невзрывоопасна. Газовые флюсы применяют чаще совместно с нейтральными газами.

Некоторые припои при использовании азотно-водородной смеси охрупчиваются вследствие образования нитридов и может происходить обезуглероживание стали. Для предупреждения таких процессов на стали электролитическим способом наносят покрытие меди, никеля, железа и других металлов.

При использовании нейтральных сред: аргона, гелия, а также вакуума, с целью улучшения диссоциации оксидов температуру нагрева при пайке назначают исходя из достижения равенства парциальных давлений кислорода оксида и среды.

Наиболее рациональным и эффективным приемом удаления оксидных пленок, образуемых на поверхности стали в процессе нагрева, является использование самофлюсующих припоев, в составе которых содержатся элементы, способные восстанавливать оксиды металлов или образовывать с ними легкоплавкие шлаки, всплывающие на поверхность расплава припоя, снижающие поверхностное натяжение и улучшающие процесс растекания припоя по стали. В качестве самофлюсующих компонентов служат бор, кремний и щелочные металлы — литий, калий, ниобий, вводимые в сталь от долей до нескольких процентов.

Действие флюсующих элементов припоя основано на высокой активности и способности образующихся их оксидов взаимодействовать с оксидами на поверхности сталей, растворяя их и переводя в легкоплав-



кий шлак, имеющий температуру плавления ниже температуры пайки. Оксиды натрия, калия, лития образуют с некоторыми тугоплавкими оксидами эвтектику с температурой плавления 500...800 °С. Присадка бора и образование боратов  $\text{LiB}_2\text{O}_3$  и  $\text{LiBO}_2$  повышают эффект флюсования. Еще более усиливают процесс самофлюсования кремний совместно с бором и щелочными металлами, благодаря образованию легкоплавкого стеклообразного шлака с малыми вязкостью и плотностью. Кремний снижает вязкость борного ангидрида.

Ценность лития – это высокое сродство к кислороду, водороду и сере. Гидроокись лития  $\text{LiOH}$  с температурой плавления 450 °С способна растворять в жидком состоянии многие оксиды металлов.

Нижний предел содержания флюсующих добавок в припое определяется степенью их эффективности, а верхний – ограничивается отрицательным влиянием добавки на технологические свойства припоя и паяных соединений.

Наилучшее качество паяных соединений обеспечивается при комплексном воздействии на оксиды самофлюсующих припоев и очищенных нейтральных газов – аргона и гелия.

Выбор припоя в каждом конкретном случае следует производить с учетом химического состава стали, формы и размеров изделия, свойств самого припоя, наличия оборудования и объемов производства.

Простейшими по составу припоями, применяемыми при высокотемпературной пайке высоколегированных сталей, являются чистая медь (М1) и медно-цинковые сплавы (латуни Л62, Л68) [6]. Температура пайки этими припоями находится в допустимых для данных сталей пределах – 950...1150 °С. Латунь имеет небольшой температурный интервал плавления. Медь и латуни хорошо смачивают хромо-никелевые стали в среде аргона и трехфтористого бора и растекаются по ним. При использовании латуней прочность паяных соединений достигает 350 МПа. Работоспособность паяных соединений сохраняется до 500 °С.

Медь в качестве припоя для высоколегированных сталей применяют редко из-за сильной ее диффузии в сталь и плохой растекаемости по ней. При пайке в печах сталей на никелевой основе (ХН78Т), при плотном контакте с паяемым металлом медь начинает диффундировать в сталь до начала плавления, а в расплавленном состоянии глубоко проникает в сталь по границам зерен, охрупчивая ее. Поэтому пайку медью необходимо проводить с высокой скоростью нагрева (токами высокой частоты), опережающей скорость процесса ее активной диффузии.

Медью выгодно паять конструкции из нагартованной стали с большим числом соединений (много-

слойные сотовые конструкции), с нанесением меди на одну из поверхностей соединяемых деталей электролитическим путем. Высокотемпературный нагрев снимает нагартованность стали, что предотвращает образование хрупких разрушений и трещин.

Межкристаллитное проникновение меди в сталь ограничивает возможности применения меди для пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных (коррозионно-стойких) сталей. Этот процесс заметно снижается при легировании меди марганцем и никелем. При содержании в меди 1...2 % кремния или 0,2...2,0 % бора предотвращается межкристаллитное проникновение меди в сталь.

Расплавленная латунь хорошо затекает в капиллярные зазоры и образует прочные паяные швы. Однако при пайке латуню также происходит межкристаллитное проникновение меди в сталь, что способствует хрупкому разрушению нагартованных сталей при индукционном или газопламенном нагреве, т.е. когда из-за быстрого и неравномерного нагрева и малой теплопроводности стали в ней могут создаваться внутренние растягивающие напряжения. Этот процесс не возникает при пайке в печах или солевых ваннах, когда обеспечивается равномерный нагрев всего паяемого узла.

При пайке в пламени горелки или индукционном нагреве следует максимально ограничивать продолжительность контакта стали с жидкой латуню, не допускать возникновения растягивающих напряжений в паяемых деталях. Такой режим нагрева также ограничивает процесс испарения цинка с поверхности припоя при печной пайке. При нагреве до 950 °С в течение 1,5 ч фольги латуни Л62 в среде проточного аргона содержание цинка в фольге снижалось с 40 до 10 %. Соответственно повышалась температура плавления фольги.

В Тольяттинском государственном университете разработана технология контейнерной пайки сталей латуню в парах цинка, при которой предотвращается испарение цинка из латуни.

При разработке припоев для высокотемпературной пайки сталей основные компоненты выбирают из известной системы металлов медь–марганец–никель, образующих между собой неограниченные твердые растворы. Их сплавы в любом сочетании обладают высокой прочностью, пластичностью и имеют температуру плавления более низкую, чем температуры плавления составляющих компонентов. Марганец и никель входят в основу высоколегированных сталей, что обеспечивает активное взаимодействие припоев со сталями.

На основе металлов указанной системы для пайки высоколегированных сталей создано большое число припоев, основой которых являются как отдельные



металлы, так и двойные или тройные сплавы: медь–никель, медь–марганец, никель–марганец, медь–никель–марганец.

Непрерывный процесс совершенствования сталей и сплавов, направленный на повышение их жаропрочности и жаростойкости, неразрывно сопровождается процессом разработки новых припоев. Учитывая сопоставимость составов сталей и припоев, а также идентичность научных и экспериментальных принципов их разработок наибольшая эффективность в их проведении обеспечивается на едином предприятии. К такому предприятию относится Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), специализирующийся на разработке высоколегированных сталей, сплавов и припоев для пайки коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных сталей и сплавов. Свыше 70 % припоев, применяемых в авиационной промышленности, разработано в ВИАМ.

Значительный ряд медных, марганцевых и никелевых припоев, разработанных в ВИАМ, позволяет выбрать припой для пайки любых современных сталей и сплавов применительно к любым условиям и режимам пайки.

Многообразие марок припоев (ВПр1–ВПр50) определяется большим числом применяемых в промышленности высоколегированных сталей и сплавов, а также разнообразием требований к паяным соединениям. Для многих никелевых жаропрочных сталей и литых сплавов пайка этими припоями является, практически, единственным методом соединения, обеспечивающим свойства даже стыковых соединений на уровне свойств паяемых металлов. Это преимущество используется при ремонте литых деталей газотурбинных двигателей.

Одним из первых припоев, созданных в ВИАМ для пайки высоколегированных (нержавеющих и жаропрочных) сталей, является припой марки ВПр1 на медно-никелевой основе, с температурой плавления 1120 °С. Пайку можно проводить с использованием любых источников нагрева, с применением твердых активных флюсов ПВ200 и ПВ201 или буры. Рекомендуемые зазоры при пайке – 0,05...0,25 мм. При температуре пайки 1150...1200 °С обеспечивается более высокая кратковременная и длительная прочность при повышенных температурах, а также пластичность по сравнению с показателями соединений, паяных латуной. По своим свойствам припой ВПр1 не уступает свойствам припоев на серебряной основе. Предел прочности стыковых паяных соединений из стали 1Х18Н9Т, работающих при температурах до 200 °С соответствует пределу прочности паяемого металла и составляет 570...600 МПа, а при 600 °С – 400...430 МПа [5].

Пайку припоем ВПр1 можно проводить при температуре 1180 °С в среде аргона, гелия, смеси аргона и трехфтористого бора или в вакууме, без использования флюса. При этом обеспечивается высокая жаропрочность соединений до температуры 600 °С.

Недостатком припоя является его высокая температура плавления, что привело к необходимости создания припоя аналогичного назначения с более низкой температурой плавления, путем значительного снижения содержания в нем никеля, наиболее тугоплавкого металла, и за счет введения в припой равнозначного количества марганца. В результате был создан припой на медно-марганцевой основе – ВПр2, с температурой плавления 980 °С, который обеспечивает качественную пайку высоколегированных сталей в печи, в нейтральной атмосфере, при температуре пайки 980...1000 °С. Допускаемые зазоры до 0,1 мм. Ввиду содержания в припое лития он обладает самофлюсующими свойствами и хорошо растекается в атмосфере водорода. Пайку можно осуществлять на воздухе без флюса и защитных средств с быстрым нагревом (ТВЧ) или в печах с использованием газообразных флюсов. Растворения паяемого металла припоем не происходит.

Пайка припоем ВПр1 не приводит к хрупкому разрушению стали при любом виде нагрева, сохраняется его высокая жаростойкость при нагреве до 990 °С.

Наиболее высокими самофлюсующими свойствами обладает припой ВПр4 на медно-марганцево-никелевой основе ввиду содержания целого комплекса легирующих добавок. Одновременное присутствие в припое лития и бора усиливает эффект самофлюсования, так как бораты лития обладают флюсующими свойствами. Литий является важной добавкой в высоколегированных припоях. Небольшие его добавки улучшают смачиваемость и жидкотекучесть припоя по высоколегированным сталям при пайке на воздухе и температуре до 1000 °С. Образующий при нагреве оксид лития, имеющий температуру плавления 1430 °С, взаимодействуя с большинством оксидов металлов, входящих в состав высоколегированных сталей, образует шлак с низкой температурой плавления. Например, с оксидом хрома, имеющим температуру плавления 1990 °С, оксид лития образует соединение с температурой плавления 517 °С. Присутствие в припое кремния совместно с литием и бором еще более усиливает процесс самофлюсования припоя при пайке, благодаря образованию легкоплавкого стекловидного шлака (боросилиция) с небольшой вязкостью и плотностью. Подобными свойствами обладают натрий, калий и фосфор, входящие в состав припоя ВПр4 в виде оксидов. При расплавлении припоя они всплывают на поверхность и, взаимодействуя с



оксидной пленкой металлов на поверхности, образуют с ней соединения с температурой плавления ниже температуры пайки. К таким элементам относятся бор и кремний.

Наличие в припое ВПр4 никеля, марганца, кобальта, железа обеспечивает ему жаропрочность до 600 °С. Температура плавления составляет 980 °С, пайки – 1000...1500 °С. Рекомендуемые зазоры – до 0,1 мм.

Снижения температуры плавления до 910 °С (припой ВПр13) удалось добиться путем снижения содержания в нем марганца и особенно никеля (в 3 раза) за счет введения в припой значительного количества серебра (до 25 %), что значительно улучшило технологические свойства припоя, но резко повысило его стоимость, что ограничивает область его применения. Путем снижения содержания марганца и никеля удалось добиться также создания припоя ПМ17 с температурой плавления 940 °С, содержащего небольшое количество бора и кремния [6].

Близким по содержанию основных компонентов к припою ВПр2 является припой П65 на медно-марганцевой основе, обладающий уникальными свойствами по хладостойкости и прочности, разработанный в ПКБ Минэнерго СССР. Температура плавления припоя составляет 980 °С. Припой обладает высокой хладостойкостью – до –269 °С. При этой температуре предел прочности припоя составляет 550 МПа, предел текучести – 290 МПа. При быстром нагреве (ТВЧ) пайка может осуществляться на воздухе без флюса и газовых сред. При пайке в печах применяют газообразные флюсы. Растворение паяемого металла при пайке не происходит. Припой успешно применяют при производстве криогенной техники из нержавеющей сталей. Температура пайки в вакууме ( $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) составляет 1000 °С.

Сплавы, приближающиеся к составу Cu 62 % и Mn 38 %, имеют минимальную температуру плавления. Припой П65 имеет более высокие механические и пластические свойства по сравнению с припоем ВПр2, что видно из сопоставления показателей их свойств, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

#### Сравнение механических свойств припоев ВПр2 и П65

| Марка припоя | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_T$ , МПа |
|--------------|------------------|------------------|
| ВПр2         | 29,3             | 18,0             |
| П65          | 36,0             | 25,0             |

С изменением температуры до –196 °С ударная вязкость, прочность на срез и угол изгиба соединения не изменяются. Шов имеет однофазную структуру твердого раствора на основе меди. Припой ВПр2 состоит из двух фаз, вторая, более крупная, располагается по границам зерен твердого раствора или ликвидирует к центру шва, ослабляя его.

Паяный припоем П65 шов, формируемый в широких зазорах, обладает высокой пластичностью и прочностью. При испытании на срез телескопических соединений, паяных с зазорами до 3 мм, прочность шва значительно превышала прочность припоя в исходном состоянии, при этом при испытании сдвиг паяного шва в направлении нагрузки превышал 30°, что опровергает принятое мнение о хрупком состоянии паяных швов.

Хладостойкий припой П65 хорошо зарекомендовал себя при пайке теплообменников криогенной техники. Наиболее высокие показатели прочности и пластичности паяных соединений обеспечиваются при нанесении на паяемые поверхности сложнолегированных сталей гальванического покрытия никеля толщиной 15...35 мкм. Припой хорошо заполняет капиллярные зазоры шириной 0,05...0,3 мм, при нахлесточных соединениях до 30 мм, независимо от пространственного положения плоскости зазора.

Хорошая растекаемость припоя по сложнолегированной стали 12Х18Н10Т обеспечивается при значительном перегреве припоя. Хорошее заполнение капиллярных зазоров наблюдается при температуре 1000 °С. При этой же температуре пайки наблюдается наиболее высокий предел прочности паяных соединений – 250 МПа. При температуре 196 °С предел прочности паяного соединения составляет 340 МПа.

Паяный припоем П65 шов устойчиво работает в условиях циклического воздействия криогенных температур. Проверка на термоциклическую усталость в условиях теплосмен показала, что при изменении температур от +20 до –196 °С физико-химические свойства припоя не изменяются даже после воздействия 500 теплосмен. Швы остаются плотными после 100-кратного цикла наружного давления 7,5 МПа. Хрупкие фазы в паяных швах отсутствуют.

Припой на медной основе ВПр1, ПМ17, ПЖ45-81 можно применять при пайке нагартованных коррозионно-стойких сталей, а также конструкций, в которых могут возникать растягивающие напряжения. Соединения, паяные припоями ВПр1 и ПЖ45-81, теплостойки до температуры 700 °С и хладостойки до –196 °С.

Современный уровень развития техники требует значительного повышения рабочих параметров изделий. Припои на медной основе не могут обеспечить надежную работу паяных конструкций при высоких



температурах и агрессивных средах. Созданная в ВИАМ группа припоев на никелевой основе позволяет получать паяные соединения, обладающие высокой прочностью и коррозионной стойкостью как при комнатной, так и при высокой температурах. Наиболее ответственные изделия, изготавливаемые из жаропрочных никелевых сплавов (детали авиационных двигателей), паяют в вакууме припоями на никель-марганцевой основе – ВПр7, ВПр10, ВПр11, ВПр11-40Н, обладающими самофлюсующими свойствами и обеспечивающими необходимую прочность соединений при работе изделий, нагретых до 950 °С. При пайке нержавеющей стали (12Х18Н10Т) припоем ВПр7, содержащим бор и кремний, существенное влияние на растекание припоя и прочность паяного шва может оказывать интерметаллидная прослойка, образуемая на межфазной границе. Введение в припой до 10 % ванадия улучшает его растекаемость. Ванадий обладает более высокой по сравнению с марганцем и хромом химической активностью к бору, кремнию и углероду, образуя интерметаллиды.

Никелевые припои легируют хромом, кремнием, марганцем, железом, бором. Хром значительно повышает прочность и жаростойкость никелевых сплавов, а также температуру плавления. Вольфрам и ниобий также повышают жаростойкость припоя и одновременно понижают его температуру плавления. Этому также способствует кремний, бор и марганец. Температура пайки никелевыми припоями достигает 1200 °С.

Высокая температура пайки никелевыми припоями снижает прочность высоколегированных сталей и особенно сложнолегированных никелевых сплавов типа ЭИ. Применение припоев с более низкой температурой пайки 1100 °С, но содержащих бор, могут вызвать активную эрозию паяемого металла. Ученые института электросварки им. Е.О. Патона рекомендуют к применению разработанные ими припои системы никель–марганец–железо, в частности, припой марки ПР-Н58Ф, температура пайки которым составляет 1100 °С [8]. По технологическим параметрам припой превосходит широко применяемые припои с высоким содержанием марганца ВПр7, Г70НХ, Г40НХ. Выпуск припоя освоен на НПО "Тулачермет".

Никель является основным компонентом в марганцевых припоях, имеющих более низкие температуры плавления, по сравнению с никелевыми припоями.

Марганец с никелем образует ряд твердых растворов и при содержании никеля 39,5 % марганцево-никелевый сплав имеет температуру плавления 1005 °С. Припои на основе марганца обладают хорошей растекаемостью и высокой пластичностью, их применяют для пайки коррозионно-стойких сталей, инконеля, нихрома и др. Пайку проводят в печах или ТВЧ в среде

нейтральных газов. Нагрев производят быстро во избежание испарения марганца из припоя. К припоям с высоким содержанием марганца относятся припои ВПр7, Г70НХ, Г40НХ.

Припои на основе систем медь–марганец, а также медь–марганец–никель показывают значительно лучшие результаты при испытании паяных ими соединений, если припои применять в виде равномерной прессованной смеси порошков чистых компонентов. В процессе пайки в местах контакта медных и марганцевых частиц появляется легкоплавкая активная фаза медно-марганцевого сплава и происходит контактно-реактивное плавление обеих частиц. Частицы тугоплавкого никеля, не расплавившиеся в процессе пайки, армируют образующийся сплав, улучшая его механические свойства. Образующиеся в результате взаимодействия никеля и марганца при пайке порошковым припоем интерметаллиды не выстраиваются в сплошные прослойки, а образуются лишь в местах контакта частиц марганца и никеля. Такое расположение интерметаллидов позволяет нивелировать их вредное влияние и получать паяные швы без ухудшения их свойств. Прочностные характеристики соединений, паяных смесью порошков из чистых компонентов, более чем вдвое ниже, чем при использовании в качестве припоя порошка готового припоя.

Увеличить жаропрочность паяных соединений можно путем обеспечения химической однородности металла в области шва, что достигается в результате протекания в соединении растворо-диффузионных процессов между расплавом припоя и паяемым металлом. Скорость выравнивания (рассасывания шва) химического состава металла в области шва возрастает с уменьшением толщины прослойки припоя между соединяемыми поверхностями. Достигнуть приемлемой для режимов пайки скорости выравнивания химического состава металла в области соединения можно только при узких капиллярных зазорах – менее 0,1 мм. Такие зазоры устанавливают при капиллярной пайке, при которой образующийся на поверхности изделия расплав припоя затекает в установленный зазор.

При пайке деталей и узлов из высоколегированных сталей в высокоточном машиностроении можно успешно применять в настоящее время забытый, но имеющий высокие технологические свойства, универсальный эвтектический шестикомпонентный припой марки ГФК на медной основе (А.С. № 91179 СССР), с температурой плавления 935 °С. Припой имеет высокую смачиваемость и под действием капиллярных сил может проникать в самые узкие зазоры, подобно расплаву меди. Сборочный зазор в изделии не должен превышать 0,04 мм. Припой ГФК самофлюсующийся и способен растворять и удалять оксидные пленки,



даже наиболее устойчивую — оксид хрома. Припой обладает высокой диффузионной способностью. При малом зазоре он быстро изменяет свой состав и становится более тугоплавким и прочным. Изменяя температуру пайки, можно регулировать механические свойства паяных соединений. Примеры применения в промышленности припоя ГФК приведены в источнике [9]. Технологическая выдержка температуры пайки приводит к исчезновению границ паяного шва и к образованию однородной структуры в области соединения.

В случае внесения твердого припоя между паяемыми поверхностями при сборке стыка под пайку аналогичные зазоры получают путем приложения давления сжатия на соединяемые детали и выдавливания избыточного расплава из устанавливаемого зазора. Такой процесс применяют взамен диффузионной прессовой сварки жаропрочных сплавов с целью снижения энергетических затрат и повышения качества соединений [4, 10].

Оптимальное давление сжатия составляет 15...18 МПа. При этом давлении толщина жидкой прослойки припоя при температуре пайки после выдержки 6 мин устанавливается в пределах 10...20 мкм. Давление на паяемый стык прикладывается после смачивания расплавом припоя паяемого металла, которое происходит практически мгновенно после расплавления припоя, в течение тысячных долей секунды. Поэтому давление прикладывают сразу после появления жидкого припоя в стыке.

Пайка жаростойких металлов и сплавов с давлением позволяет получать соединения при низких, по сравнению с диффузионной сваркой, удельных давлениях сжатия соединяемых деталей. Это достигается благодаря активизирующей способности жидкой прослойки припоя, ускоряющей процесс удаления термодинамически стойкой оксидной пленки с соединяемых поверхностей и легирования металла шва за счет процессов растворения и диффузии элементов паяемого металла. Роль прилагаемого давления сжатия заключается в максимально возможном удалении жидкой прослойки припоя из соединения, толщина которого в значительной степени определяет прочность и коррозионную стойкость паяного соединения. К применяемым при этом припоям предъявляют определенные технологические требования, основными из которых являются:

- наличие общей основы с паяемым металлом;
- отсутствие ухудшения механических и коррозионных свойств паяемого металла при температуре пайки;
- способность припоя растворять паяемый металл с сохранением жидкотекучести;

- отсутствие в шве тугоплавких химических соединений, препятствующих удалению припоя из зазора при сжатии;

- быстрое диффундирование компонентов припоя в паяемый металл и отсутствие его охрупчивания при этом.

Широкое применение в промышленности имеют жаропрочные никелевые сплавы со сложным легированием: ХН75МБТЮ, ХН50МВКТЮ, ХН67МВТЮ, ХН60МВТЮ и др. Если сварка недисперсно-твердеющих сплавов ХН75МБТЮ не вызывает непреодолимых затруднений, то образование горячих трещин при сварке дисперсно-твердеющих сталей ХН62МВКТЮ затрудняет или исключает сварку таких сталей. Использование пайки с выдавливанием прослойки припоя из зазора с последующей термообработкой позволяет эффективно решать проблему соединения таких металлов. Возможность выдавливания и интенсивное взаимодействие жидкой прослойки припоя с паяемым металлом позволяет применять в качестве припоев как двухкомпонентные, так и многокомпонентные системы.

В качестве припоев при диффузионной пайке следует применять сплавы, которые с паяемыми металлами имели хотя бы ограниченную растворимость для обеспечения сглаживания микронеровностей и диспергирования оксидной пленки на поверхности паяемого металла. Основой таких припоев является никель. С целью повышения жаропрочности в состав припоев вводят до 20 % хрома, а в качестве депрессантов такие элементы, как кремний, бор, марганец, титан, ванадий, ниобий и другие. Такими двойными сплавами являются Ni+12 % Si, Ni+40 % Mn, Ni+4 % В и припои ВПр7, ВПр8, ВПр11.

При пайке сплава ХН77ТЮР припоем ВПр7 предел прочности паяных соединений при 800 °С достигает 167 МПа, при пайке припоем ВПр8 — 245 МПа. Еще более высокая прочность обеспечивается при пайке припоем ВПр11, созданным на основе двойных систем Ni—Si, Ni—В. При 900 °С предел прочности соединений достигает 152 МПа. Припой ВПр11 более активен во взаимодействии с паяемым металлом ввиду содержания в нем хрома, кремния и бора. Коэффициент эрозии припоя ВПр11 при температурах 1150...1170 °С в 2—2,5 раза больше, чем у припоя ВПр7.

При взаимодействии расплава припоя с паяемым металлом в процессе капиллярной пайки на его поверхности образуется тонкий прикристаллизованный слой с минимальным содержанием легкоплавкого элемента, замедляющий дальнейшее растворение и препятствующий обогащению центральной части прослойки припоя элементами паяемого металла. Приложение давления обеспечивает удаление жидкой



фазы и ввода в контакт прикристаллизовавшихся слюев. Так как активность раствороно-диффузионных процессов зависит от температуры, то после приложения усилия сжатия и выдавливания жидкости целесообразно несколько поднять температуру для растворения основного металла оставшимися микрообъемами жидкой фазы и ее изотермической кристаллизации. С повышением температуры пайки возрастает растворимость паяемого металла и обогащение припоя его элементами. Аналогичные зависимости характерны для сплавов марок ХН70ВМТЮФ, ХН75МБТЮ, ХН50МВКТЮ.

Выбирая температуру диффузионной пайки жаропрочных сплавов необходимо учитывать особенности этих материалов. Нижним пределом температуры пайки является температура начала процессов рекристаллизации и диффузии. Для жаропрочных сплавов на никелевой основе температура рекристаллизации при деформациях 8...10 %, характерных для диффузионных соединений, составляет 1050...1100 °С, т.е. 0,75...0,80 температуры плавления. Верхним пределом температуры диффузионной пайки является температура начала интенсивного роста зерна и разупрочнения сплавов.

При повышении температуры может происходить снижение пластичности сплава. Если в результате сжатия при пайке деталей пластическая деформация превзойдет предельно допускаемую пластичность металла, то в зоне соединения будут образовываться трещины. Поэтому температуру пайки следует назначать в интервале, которому соответствуют высокие пластические свойства металла.

В процессе эксплуатации паяных соединений при высоких температурах их химическая однородность повышается, концентрация хрома практически полностью, а марганца — в значительной степени выравнивается.

Возможны различные варианты введения в стык припоя: в виде фольги или порошка, нанесение покрытий химическим, гальваническим, газопламенным, вакуумным напылением и др.

Наиболее оптимальной средой для диффузионной пайки жаропрочных сталей является вакуум  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па или водород с точкой росы 313 К.

Удаление жидкой прослойки припоя при сжатии обеспечивает высокую гомогенность металла в зоне соединения непосредственно после пайки в течение нескольких минут. Последующая даже кратковременная термическая обработка приводит к практически полному выравниванию химического состава металла в зоне соединения.

Метод пайки высоколегированных сталей с выдавливанием расплава припоя из паяльного зазора требует применения сложного прессового оборудования,

что ограничивает возможность его применения. Содержание в высокотемпературных припоях депрессантов приводит к невозможности получения заготовок припоя традиционными способами (штамповкой, прессовкой). Наиболее надежным и простым способом пайки с указанными малыми зазорами является применение заготовок припоя, толщина которых соизмерима с толщиной данных зазоров.

В МАТИ им. К.Э. Циолковского разработана технология получения ленточных припоев из хрупких сплавов методом аморфизации. Аморфная структура припоев с высокими прочностными и пластическими характеристиками формируется в процессе быстрого затвердевания расплава припоя, подаваемого на вращающийся барабан-кристаллизатор. Высокая скорость охлаждения расплава ( $10^4 \dots 10^6$  °С/с) позволяет измельчить структуру припоя и полностью подавить процессы кристаллизации. При этом фиксируется состояние переохлажденного твердого раствора с растворимостью компонентов в основе сплава, близкой к их растворимости в расплаве. Поэтому затвердевший сплав имеет гомогенную структуру с равномерным распределением легирующих элементов по объему сплава [11].

Технология быстрого затвердевания расплавов на вращающемся охлаждаемом барабане или диске-холодильнике позволяет получать любые припои в виде тонкой гибкой ленты толщиной 20...100 мкм и шириной до 50 мм. Высокая химическая однородность припоя марки СТЕМЕТ, узкий температурный интервал плавления и равномерное распределение элементов по объему позволяют ему иметь хорошую смачиваемость паяемого металла, повышенную капиллярность и диффузионную активность, а также исключают появление в паяном шве хрупких образований.

Жаропрочные никелевые припои обладают максимальной прочностью при зазорах до 0,07 мм, шов имеет структуру твердого раствора. При более широких зазорах наблюдается резкое снижение свойств паяного шва, которые могут быть повышены путем проведения гомогенизирующего отжига или с применением давления на паяемый стык.

Длительный отжиг, который совмещают с процессом пайки, повышает пластичность соединения за счет диффузии бора, бериллия и кремния в паяемый металл. При пайке припоями, содержащими бор, может происходить значительное растворение паяемого металла и проникновение припоя по границам зерен металла, поэтому эти припои непригодны для пайки тонкостенных конструкций.

Для пайки высоколегированных сталей разработана технология изготовления аморфного припоя мар-





ки СТЕМЕТ 1301, выпускаемого в виде гибкой ленты толщиной 20...50 мкм и шириной до 50 мм.

При высоком (до 10 %) содержании в припое бора и кремния малая толщина аморфной ленты обеспечивает пониженную эрозию паяемых металлов вследствие значительного снижения времени пайки. В результате обеспечивается высокое качество тонкостенных деталей из коррозионно-стойких и никелевых сплавов, например, при изготовлении теплообменников, решетчатых и слоистых конструкций, в том числе сотовых, при создании узлов двигателей летательных аппаратов.

Технологии пайки узлов двигателей с применением припоя СТЕМЕТ 1301 разработана в ОАО "НИАТ". Модификация этого припоя путем изменения содержания марганца (до 1 %) успешно используется при изготовлении автомобильных нейтрализаторов выхлопных газов из фехрала. Припой обеспечивает высокое качество пайки гофрированных конструкций без предварительной подготовки поверхностей соединяемых деталей.

Кафедра физических проблем материаловедения МИФИ и предприятие, выпускающее припой МИФИ-АМЕТО, разрабатывают и предлагают потребителям любые марки аморфных припоев.

На основе технологии быстрого затвердевания разработан метод получения многокомпонентных двухслойных ленточных припоев. Их получают путем совместного охлаждения двух расплавов различного химического состава на едином закалочном колесе холодильника. Плоские струи расплавов поступают на закалочное колесо из двухкамерного тигеля с индукционным нагревом. Расплавы плавятся одновременно и под избыточным давлением подаются на закалочное колесо, где соединяются в момент их сверхбыстрого затвердевания. В результате образуется двухслойная тонкая лента шириной 10...12 мм, толщиной 40...50 мкм. Смешивание компонентов припоев происходит только в очень узкой зоне контакта шириной 100...150 нм. Температура плавления ленты значительно ниже температуры составляющего припоя с более высокой температурой плавления.

Получение двухслойных аморфных припоев открывает возможность проведения пайки разнородных материалов, в частности, коррозионно-стойкой стали и жаропрочных сплавов. Получена лента двухслойного припоя системы СТЕМЕТ 1342 и СТЕМЕТ 1301.

Наиболее простым и доступным способом соединения небольших деталей из высоколегированных сталей является контактно-реактивная пайка с нанесением на паяемые поверхности деталей покрытий систем медь-марганец и медь-марганец-никель, которые в результате контактного плавления образуют жидкую фазу, выполняющую роль припоя. Покрытия

на паяемые поверхности можно наносить методом термического испарения и конденсации металла в вакууме. Этот способ легко может быть механизирован и автоматизирован. Покрытия можно наносить на детали любых размеров и форм, а также получать тонкие пленки различных металлов и сплавов [12].

При многослойном покрытии его наносят послойно. Очередность нанесения компонентов покрытия определяют исходя из химической активности и упругости пара компонента. При использовании системы медь-марганец вначале должен быть нанесен марганец с целью предупреждения его испарения в процессе пайки. Для системы медь-марганец-никель вначале наносят никель, на него – марганец, затем медь. Соотношение компонентов сплавов припоев следует пересчитывать на толщину покрытий, задаваясь общей толщиной покрытия, процентным соотношением компонентов припоя и их плотностью.

Известно, что качество и работоспособность паяного соединения в основном определяется правильным выбором температуры пайки. Нижний температурный предел устанавливают из диаграмм состояния сплавов припоя медь-марганец и медь-марганец-никель, а верхний – исходя из структурных изменений, протекающих в паяемых металлах при воздействии термических режимов пайки.

При пайке образцов из стали X18H10T в вакууме и в защитных газах (аргон) через покрытие системы медь-марганец максимальная прочность соединения (480 МПа) достигалась при температурах пайки 950...960 °С, а через покрытие системы медь-марганец-никель – при 1000...1100 °С, при выдержках 10...20 мин. Оптимальное давление на стык составляло 0,2...0,5 МПа.

Контактно-реактивную пайку возможно осуществлять через тонкие прокладки марганца, кремния и ниобия, титана. При использовании прокладок из титана и ниобия контактное плавление в вакууме ( $10^{-5}$  Па) проводят при температуре 1200 °С, время пайки – 6 мин. После пайки проводят отжиг при той же температуре при усилии сжатия деталей 8 МПа в течение 8 мин. При использовании прокладки из ниобия, образующиеся интерметаллиды равномерно распределяются по объему паяного шва, избыточная жидкая фаза под давлением удаляется из зазора. Шов, паяный с прокладкой титана, имеет структуру, характерную для никеля, что связано с большой диффузионной подвижностью титана в никелевых сплавах. Прочность соединений, паяных с использованием прокладок из титана и ниобия при 900 °С, составляет 700 МПа, что соответствует прочности жаропрочных сталей и сплавов.

Контактно-реактивное плавление способствует повышению химической активности образуемого



припоя, повышается качество паяных соединений. Снижения концентрации депрессантов в шве, повышения однородности шва и жаропрочности соединений достигаются увеличением температуры пайки, применением длительного отжига, а также сжатием соединяемых деталей, при котором уменьшается толщина прослойки припоя в зазоре.

При использовании изготовленных из готовых сплавов припоев требуется установка узких капиллярных зазоров между соединяемыми деталями, что ограничивает область их применения и исключает возможность ремонта литых изделий. Для пайки соединений с широкими сборочными зазорами требуются специальные припои, которые удерживались бы в широких зазорах на протяжении всего цикла пайки. Такими свойствами обладают композиционные припои, представляющие собой механическую смесь порошков легкоплавкой составляющей и тугоплавкого наполнителя (вольфрам, молибден, хром, никель). При температуре пайки легкоплавкая составляющая полностью расплавляется. Наполнитель при этом не плавится, его частицы, располагающиеся равномерно по объему припоя, образуют систему разветвленных каналов, заполненных жидкой легкоплавкой составляющей. В процессе выдержки при температуре пайки наполнитель растворяется в жидкой фазе, изменяя ее физико-химические свойства (температуру плавления, вязкость, поверхностное натяжение и др.). Повышение температуры плавления припоя и вязкости его расплава способствует удержанию расплава припоя в широком паяльном зазоре. В зависимости от времени выдержки и температуры пайки можно добиться полного растворения тугоплавкого наполнителя в расплаве припоя или сохранить его частицы в структуре паяного шва.

Для пайки коррозионно-стойких и жаропрочных сталей разработаны и применяются композиционный припой марки 5ВА (ПХ10Н64В15С7П по ТУ 1421-3178-88) и другие, в качестве легкоплавкой составляющей в которых используется порошковый припой ПН74п (ГОСТ 23861-79), известный под наименованием 5А. Этот припой широко применяется для капиллярной пайки коррозионно- и кислото-стойких сталей. Наполнителями в указанных припоях являются порошки вольфрама, молибдена и сплава Х20Н80. Размер частиц порошка основы припоя, легкоплавкой составляющей и наполнителя составляет до 100 мкм [13].

Лучшие результаты по формированию паяных швов показывает композиционный припой 5ВА, содержащий наполнитель из вольфрама (15 %). Этот припой не вызывает заметного растворения паяемого металла и обеспечивает образование достаточно плотных и жаропрочных соединений. При пайке припоем

5ВА вольфрам полностью растворяется в припое и образует расплав, который удерживается в широком зазоре – до 0,6 мм.

Применяемые при пайке газовые среды, вакуум не только защищают соединяемые поверхности от окисления в процессе нагрева, но и снижают поверхностное натяжение расплавленного припоя, улучшая смачивание легкоплавкой составляющей паяемого металла и наполнителя.

Введение в припой 5А других наполнителей позволило придать композиционным припоям и паяным ими соединениям специальные технологические и служебные свойства.

Путем введения в припой 5А порошка из сплава Х18Н15 (10 %) был получен припой марки 5АН, который не только обеспечивает надежное затекание и удержание расплава припоя в широком зазоре, но и повышает стойкость паяных соединений в агрессивных средах. Введением в припой 5А молибденового порошка (15 %) был получен припой марки 6МА, позволяющий получить качественные соединения в широких зазорах и обеспечивающий образование соединений с более высокой температурой плавления образующегося паяного шва, т.е. соединений, характеризующихся более высокой температурой нагрева при их распаивании.

Необходимо отметить, что затекание композиционных припоев в тупиковые участки зазора лучше происходит в вакууме. В условиях вакуума происходит качественное затекание не только в широкие, но и в капиллярные зазоры. Композиционные припои указанных марок изготавливает металлургическая промышленность и они могут быть синтезированы потребителем путем смешивания порошков припоя 5А и наполнителя. Легкоплавкую составляющую припоев – припой 5А изготавливают гидрокальциевым методом. Полученные припои хорошо прессуются в заготовки, удобные для нанесения на паяемые поверхности. Эти же припои применяют также в виде паяльных паст и эластичных лент. Приведенные методы изготовления композиционных припоев применимы для изготовления других марок припоев.

Таким образом, порошкообразные композиционные припои не вызывают трудностей при изготовлении и нанесении их на участок пайки.

Композиционные припои образуют плотные паяные швы без заметного растворения паяемого металла. Припои хорошо смачивают поверхности коррозионно-стойких и жаропрочных сталей в проточном аргоне и затекают в широкие и неравномерные зазоры. В табл. 2 приведены пределы прочности на срез паяных припоями 5АН и 6МА соединений из стали 12Х18Н10Т при различных температурах.



Таблица 2

**Пределы прочности на срез соединений,  
паяных припоями 5АН и 6МА**

| Марки припоя | Предел прочности, МПа, при температуре $t, ^\circ\text{C}$ |     |     |
|--------------|--|-----|-----|
|              | 20   | 600 | 800 |
| 5АН          | 300  | 280 | 190 |
| 6МА          | 340  | 300 | 250 |

Приведенные в табл. 2 композиционные припои разработаны в НПО "Техномаш".

Особенностью современного транспортного и энергетического машиностроения является непрерывное повышение температуры эксплуатации рабочего тела.

Прогрессивное развитие авиационной и ракетной техники непрерывно повышает требования к жаропрочности и жаростойкости конструкционных материалов, используемых в изделиях горячего тракта газотурбинных двигателей, в частности, турбинных лопаток.

В процессе совершенствования жаропрочных сплавов было определено, что наиболее широкие возможности заложены не в деформируемых, а в литейных сплавах. Это связано с тем, что применение традиционного способа повышения свойств сталей и сплавов путем сложного легирования затрудняет или делает невозможным их деформирование вследствие снижения пластичности и термической стойкости, и приводит к разбросу показателей механических свойств. Высокие термические напряжения, возникающие в охлаждаемых лопатках, являются основной причиной их разрушения.

Наиболее надежными и освоенными в производстве являются недеформируемые литейные сплавы на никелевой основе, выплавляемые в вакууме, имеющие гетерогенную структуру с интерметаллидным упрочнением. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе занимают первое место по масштабам производства и объемам применения среди высокотемпературных материалов конструкционного назначения. В современном металловедении жаропрочные никелевые сплавы являются металлами с наибольшей степенью сложности по легированию (содержат до 15 основных легирующих элементов) и структуре. Эти сплавы относятся к классу дисперсно-твердеющих и состоят из сложнолегированного никелевого твердого раствора –  $\gamma$  фазы, мелкодисперсной упрочняющей  $\gamma'$  фазы, а также карбидов и боридов различного типа [14].

Основная твердость и прочность сплавов достигается созданием в них легкодисперсных частиц  $\gamma'$  фазы на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , образующегося в результате распада твердого никелевого раствора в процессе охлаждения сплава. Обе фазы –  $\gamma$  и  $\gamma'$  – изоморфны друг другу, имеют одинаковую гранецентрированную кристаллическую решетку с небольшой разницей в ее периодах. Объем  $\gamma'$  фазы в сплаве может достигать 60...70 %. Дисперсность частиц фазы может составлять от сотых до десятых долей микрометра и наблюдаться при 5000...10 000 кратном увеличении.

Чем больше в сплаве  $\gamma'$  фазы, тем выше его жаропрочность. Основными образующими элементами являются алюминий и титан, от суммарного содержания которых зависит жаропрочность сплава. В никелевых сплавах реализуется также карбидное и боридное упрочнения.

До определенного периода рабочую температуру жаропрочных никелевых сплавов повышали путем сложного легирования тугоплавкими элементами, увеличивающими содержание в сплаве дисперсно-упрочняющей  $\gamma'$  фазы. При этом происходило снижение пластичности. В результате исследований определено новое направление совершенствования никелевых жаропрочных сплавов – изменение их структуры. Этот путь совершенствования позволяет не только повышать жаропрочность сплавов, но и одновременно пластичность, термостойкость и выносливость [15].

Сопоставление характеристик показывает, что наиболее известный литейный сплав ЖС6У с направленной кристаллизацией существенно превосходит по сопротивлению термоусталости один из лучших деформируемых сплавов ХН51МТЮКФР (ЭП220). Для повышения жаропрочности и жаростойкости литейного сплава ЖС6У его легируют большим количеством вольфрама (9...11 %) и небольшим количеством молибдена (1,2...2,4 %).

Сплавы с равноосной структурой имеют зерна, границы которых приблизительно одинаково удалены от центра зерна (при отсутствии направленного теплоотвода). Уровень прочности жаропрочных сплавов в большей степени зависит от степени совершенствования границ зерен, что регулируется микролегированием и условиями кристаллизации, при которых обеспечивается однородность распределения зерен и их границ. При равноосной структуре сплава разрушение в процессе ползучести происходит чаще по поперечным границам зерен. Поэтому традиционным методом упрочнения границ зерен является микролегирование сплава. При сварке и пайке может происходить ослабление и разрушение этих границ, что снижает жаропрочность и жаростойкость соединений. К таким сплавам с равноосной структурой относятся сплавы ЖС6У, ЖС26ВИ, применяемые при



изготовлении лопаток газовых турбин, работающих в условиях больших напряжений при высоких температурах и имеющие высокую сопротивляемость термической усталости.

Разработка и создание жаропрочных никелевых сплавов сопровождалась процессом разработки специальных припоев и технологий пайки этих сплавов, основной задачей которого являлось получение соединений с прочностью, сопоставимой с прочностью паяемого сплава при высоких температурах. Высокая жаропрочность паяных соединений сплавов обеспечивается сближением состава и структуры паяного шва с паяемым сплавом. Припои должны обладать максимально возможным сходством по химическому составу и структуре с паяемым сплавом.

В ВИАМ разработано множество припоев для пайки никелевых жаропрочных сплавов ВПр11, ВПр24, ВПр37, ВПр42, ВПр44 и др., в которых депрессантами являются бор и кремний [6]. Состав припоя и режимы пайки подбирают таким образом, чтобы после значительного диффузионного взаимодействия припоя с паяемым сплавом происходило упрочнение межзеренных границ. Легирование припоем осуществляется таким образом, чтобы целенаправленно изменить химический состав образующихся границ зерен и сделать их более прочными, чем границы зерен, образовавшиеся из-за рекристаллизации паяемого сплава.

При определенных условиях депрессанты припоев – бор и кремний, могут отрицательно влиять на стабильность фазового состава и жаропрочность никелевых сплавов. Проведенные в ИЭС им. Е.О. Патона разработки показали, что в качестве депрессантов целесообразно применять цирконий, ванадий, ниобий [16]. Наиболее приемлемыми припоями являются припои на основе легированных эвтектических сплавов: Ni–Cr–Zr, Ni–Cr–Hf, образующие пластичные интерметаллиды, что позволяет регулировать твердость паяного шва, приближая ее к твердости паяемого сплава. При этом устраняется недостаток припоев с кремнием – хрупкость и высокая твердость, возникает возможность повышения содержания в припое хрома ввиду его слабого влияния на температуру ликвидуса припоя. Это позволяет регулировать состав припоя в широких пределах.

Известно, что высоколегированные никелевые сплавы с высоким содержанием  $\gamma'$  фазы сварке не подлежат. При значительном перегреве зоны термического влияния в ней появляются жидкие прослойки по границам зерен, что приводит к падению прочности сплава. В результате даже при небольших напряжениях возникают горячие трещины. При использовании при сварке присадочного металла (электродов), близкого по химическому составу к сплаву, отсутствует возмож-

ность "залечивания" трещин, поскольку температура затвердевающего металла сварочной ванны высока и трещины остаются изолированными от затвердевающей сварочной ванны. Сравнительно низкая температура жидкого припоя, хорошо смачивающего паяемые поверхности и растекающегося по ним, позволяет припою при температуре пайки затекать в образуемые трещины и восстанавливать монолитность сплава в зоне термического влияния.

Если сварочный процесс неприменим при использовании литейных никелевых сплавов, то способ дугового нагрева при пайке является весьма эффективным средством устранения горячих трещин. При этом лучше использовать не литые, а порошковые припои, которые представляют собой механические смеси из порошка легкоплавкого сплава системы Ni–Cr–Zr и тугоплавкого наполнителя – порошка высокотемпературного сплава ЖС6У в определенном соотношении. При дуговом нагреве необходимо обеспечить минимальное тепловложение, достаточное для смачивания расплавом припоя паяемого сплава, но не достаточное для образования в околошовной зоне сплава межкристаллитных жидких прослоек [17].

С помощью такого припоя можно регулировать не только состав наплавляемого при ремонте лопаток слоя, но и регулировать структуру – равномерность распределения дисперсных участков твердого раствора и эвтектики. Способ обеспечивает качественный ремонт дорогостоящих лопаток газовых турбин с литейными дефектами или после их эксплуатации. Сочетание дугового нагрева и адгезионно активного припоя на основе указанной системы является эффективным средством при ремонте деталей газовых турбин. Использование композитного припоя позволяет исключить появление горячих трещин и получить однородную мелкодисперсную структуру наплавляемого металла, благоприятную для последующей термообработки.

Такой способ пайки сплава ЖС6У-ВИ, содержащего 60 %  $\gamma'$  фазы, проводимый в вакууме и при использовании дугового нагрева, позволяет получать паяные соединения с высокой кратковременной прочностью (при 800 °С – 615...656 МПа), а после термообработки – гомогенную структуру. Жидких прослоек в околошовной зоне не образуется [14].

Более перспективны никелевые сплавы с направленной столбчатой структурой или монокристаллические сплавы, кристаллы которых вытянуты вдоль действия основного силового напряжения в рабочей части отливки. В этих сплавах отсутствуют границы, расположенные в направлении, перпендикулярном действию напряжений (ЖС26, ЖС32). Если затвердевание сплава осуществляется из одного центра (используется монокристаллическая затравка при выращивании кри-



сталла), то структура представляет собой единый кристалл. Такие отливки с монокристаллической структурой обладают наиболее оптимальным сочетанием прочности, пластичности, усталости и других характеристик с наименьшим разбросом механических свойств (ЖС36, ЖС40).

Исключение поперечных границ зерна путем направленной кристаллизации позволяет технологическим методом одновременно повысить жаропрочность и термостойкость сплавов. По длительной прочности монокристаллические сплавы не отличаются от сплавов со столбчатой структурой, но их термостойкость выше, а разброс показателей при испытаниях ниже. Ввиду отсутствия границ зерен отпадает необходимость вводить в сплавы легирующие элементы, упрочняющие эти границы (углерод, бор, цирконий, гафний). Исключение углерода из сплава приводит к отсутствию карбидов – источника зарождения трещин при циклических нагрузках.

Особенность монокристаллических сплавов накладывает на процесс пайки ряд требований и условий, отличающихся от пайки сплавов с равноосной структурой. Основной особенностью является предотвращение образования рекристаллизационных зерен в области паяного шва [18].

Состав припоя и режимы пайки могут быть подобраны таким образом, что после значительного диффузионного взаимодействия припоя и монокристаллического сплава, паяный шов определялся бы как граница двух монокристаллов. Легирование припоя должно быть направлено на то, чтобы целенаправленно изменить химический состав образующейся границы и сделать эту границу более прочной, чем граница с рекристаллизованными зернами. Таким образом, прочность соединения с двумя частями монокристалла может быть приближена к прочности паяемого сплава. Для обеспечения высокой жаропрочности соединения для каждого сплава необходимо подбирать свою композицию припоя и режим пайки.

Образование рекристаллизационных зерен при пайке может происходить из-за наклепа при механической обработке паяемых поверхностей сплава и в результате нагрева выше температуры начала рекристаллизации. Когда не удастся исключить образование рекристаллизационных зерен по границе припоя и сплава, необходимо, чтобы вновь образовавшиеся границы зерен не снижали жаропрочность монокристаллического сплава. Укрепление образованных границ зерен обеспечивается за счет диффузионного процесса из легированного припоя в паяемый сплав. Это налагает определенные ограничения на технологию пайки и подготовку паяемых поверхностей.

При пайке сплава ЖС36 со столбчатой структурой при температуре пайки 1220 °С происходит образова-

ние рекристаллизационных зерен, которые могут активно прорасти внутрь монокристалла, ослабляя его. Вредное влияние рекристаллизации можно исключить, если припой будет содержать легирующие элементы, проникающие в сплав и тормозящие рост рекристаллизационных зерен в диффузионной зоне. Это не снизит прочность сплава, так как границы вновь образованных зерен, обогащенные легирующими элементами припоя, увеличивают прочность кристалла. В результате паяное соединение имеет прочность, близкую к прочности паяемого сплава. При пайке сплава ЖС36 припоями ВПр37 и ВПр44 идет взаимная диффузия между расплавом припоя и сплавом, в результате происходит растворение последнего в припое и проникновение легирующих элементов из припоя в сплав. При затвердевании припоя по границе со сплавом происходит кристаллизация  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля и отеснение эвтектики к середине зазора. В процессе изотермического затвердевания припоя в зазоре происходит рассасывание и исчезновение эвтектики. Образующиеся на границе припоя и сплава бориды препятствуют росту рекристаллизационных зерен, образующихся на границе (рис. 1).

Определено, что при указанной пайке сплава ЖС36 припоем ВПр44 размер рекристаллизационных зерен на границе с припоем не превышает 50 мкм при размере диффузионной зоны 100 мкм, т.е. границы зерен находятся в пределах зоны диффузионного взаимодействия припоя со сплавом, что привело к их упрочнению элементами припоя. Легирование диффузионной зоны элементами припоя в процессе диффузионного взаимодействия оказалось эффективным и предотвратило миграцию рекристаллизационных зерен в глубь монокристалла. Следовательно, для

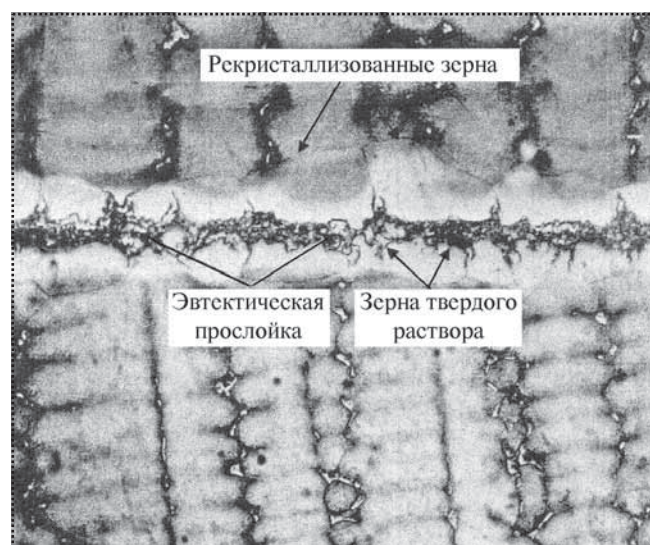


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 150$ ) соединения из сплава ЖС36, выполненного припоем ВПр44 [18]



пайки монокристаллических сплавов можно применять припой ВПр44 с предварительной механической обработкой сплава, с возможным совмещением процесса пайки с термической обработкой [19].

При пайке сплавов со столбчатой структурой (ЖС32) припоем ВПр44 с целью ослабления вредного влияния механической обработки на свойства паяного соединения рекомендовано подвергать подготовленные к пайке паяемые поверхности травлению (на глубину 20 мкм). Прочность паяных стыковых и нахлесточных соединений может достигать при температурах до 1000 °С до 0,8 от прочности паяемого сплава (ЖС32). Температура пайки составляет 1220...1260 °С.

В состав жаропрочных сплавов включают также дорогостоящие легирующие элементы, такие как рений и рутений [14]. Несмотря на дороговизну, их применение открывает более широкие возможности по повышению свойств сплавов и их эксплуатационных характеристик. Рений существенно повышает жаропрочность сплавов (как и вольфрам), является одним из немногих элементов, повышающим температуру плавления никелевых сплавов и оказывает наиболее заметное влияние на термостабильность  $\gamma$  фазы твердого раствора. Рений входит в основном в твердый раствор и способствует вытеснению из него в  $\gamma'$  фазу стабилизирующих элементов — алюминия и тантала. К высокореневым жаропрочным никелевым сплавам относятся сплавы марок ЖС47 (9 % Re) и ЖС49 (12 % Re).

Для качественной пайки современных жаропрочных никелевых сплавов, в том числе и с высоким содержанием рения, ИЭС им. Е.О. Патона предложено применять порошковый композиционный припой, состоящий из более легкоплавкого припоя #1 системы Ni—Co—Cr—Al + 2,5 В (США) и тугоплавкого сплава марки Rene-142 на никелевой основе, содержащего Ta, Re, Si, Hf (США). Наполнитель может представлять собой смесь порошков указанного и паяемого сплава.

Композиционные порошковые припои обеспечивают смачивание и растекание припоя по поверхности сплава при заданной температуре пайки и путем насыщения припоя элементами наполнителя формируют необходимые состав и структуру паяного шва.

При пайке композиционным припоем с наполнителем образуемая первичная жидкость припоя растекается по поверхности частиц наполнителя и паяемого металла и происходит процесс контактно-реактивного спекания (пайки), связанный с проникновением жидкой фазы по границам зерен наполнителя и паяемого металла. В процессе изотермической выдержки выше температуры солидуса припоя происходит процесс контактного плавления в зазоре, определяемый скоростью элементов твердого и жидкого металлов.

Взаимодействие твердых частиц с расплавленным припоем приводит к изменению его химического состава, в результате припой обогащается компонентами наполнителя.

Боридная эвтектика в процессе кристаллизации припоя #1 системы Ni—Co—Cr—Al + 2,5 В приводит к охрупчиванию и к снижению сопротивления газовой коррозии. Активное проникновение бора по границам зерен приводит к межкристаллитной коррозии.

С целью повышения вязкости припоя и уменьшения химической активности припоя по отношению к паяемому сплаву в качестве наполнителя в порошковый припой вводят порошок суперсплава Rene-142 (близкого по структуре к никелевым жаропрочным сплавам). При смешивании порошков боридного припоя наполнителя Rene-142 расширяется интервал плавления — кристаллизации паяльной смеси до 240 °С.

Содержание в сплаве Rene-142 рения (повышающего окалиностойкость) приводит к повышению высокотемпературной прочности  $\gamma$ -фазы твердого раствора и увеличивает термическую стабильность  $\gamma'$ -фазы. Использование сплава Rene-142, содержащего рений, обеспечивает возможность осуществлять качественную пайку современных жаропрочных никелевых сплавов.

При пайке на различных режимах сплава ВЖЛ12У лучшими паяльными смесями из порошков никелевых сплавов являются припой #1 с 40...50 % Rene-142 и с 35 % Rene-142 + 15 % ЖС6У в качестве наполнителя [21]. Оптимальная температура пайки составляет 1210...1220 °С, продолжительность пайки — 10...15 мин. Предел прочности паяных соединений составляет свыше 800 МПа. Хрупкое межзеренное разрушение швов отсутствует. На гидродинамическом стенде Института проблем прочности НАН Украины были проведены термоциклические прижоговые испытания фрагментов реактивных створок двигателей, спаянных композиционными припоями, в продуктах сгорания керосина при 1000 °С. Термоусталостных разрушений в зоне пайки после 100 термоциклов не выявлено. Структура металла шва в различных зонах представлена на рис. 2.

Для увеличения жаропрочности борсодержащего припоя #1 и уменьшения его реакционной способности по отношению к паяемому сплаву в композиционный припой вводят порошок с содержанием кремния НС12 (Ni — 12 % Si). Эвтектический никелевый припой НС12 улучшает флюсование припоя и изменяет фазовый состав припоя и паяного шва, повышает механические свойства паяных соединений. Добавляемый в сплав кремний снижает температуру плавления паяльной смеси и влияет на растворимость бора в матрице шва [22].

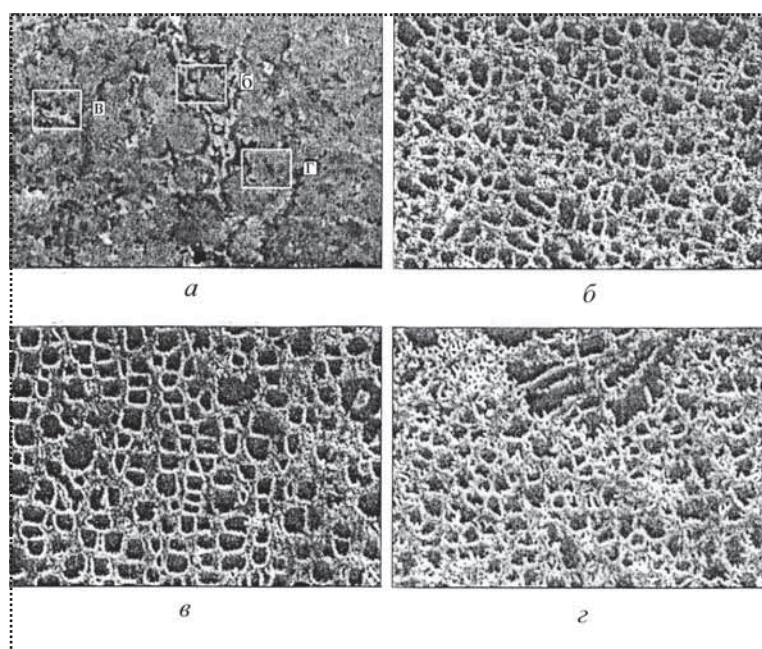


Рис. 2. Тонкая ( $\gamma - \gamma'$ ) структура металла паяного шва ВЖЛ12У (60 % #1 + 40 % Rene-142) ВЖЛ12У (а) на образце ПС, полученном при 1220 °С в течение 10 мин, после двухступенчатой термообработки в различных зонах, а также  $\gamma'$  фаза в шве (б); основном сплаве (в) и диффузионной зоне (г); (а –  $\times 140$ ; б–г –  $\times 5000$  [22])

Паяные соединения литейных сплавов ВЖЛ12У и ЖС26-ВИ, полученные с использованием композитного припоя состава 20 % припоя #1 + 20 % НС12 + 60 % Rene-142 характеризуются прочностью на уровне прочности паяемых сплавов. Их пластичность в 2,5...4,0 раза превышает пластичность соединений, паяных с применением припоя состава: 40 % припоя #1 + 60 % Rene-142. Кратковременная прочность паяных соединений при 900...1000 °С составляет 80 % от прочности паяемых сплавов [23, 24].

Литейные жаропрочные никелевые сплавы, применяемые в производстве газотурбинных двигателей, подвергаются сложной термической обработке с целью повышения однородности структуры, упрочнения и улучшения пластичности металла. Литые лопатки турбин подвергаются трех-, четырехстадийной термической обработке для гомогенизации литейной структуры и улучшения технологических характеристик.

В случае ремонтной пайки изделий из литых никелевых жаропрочных сплавов те же приемы термической обработки переносят на восстанавливаемые пайкой изделия, включающие высокотемпературный отжиг для выравнивания химического градиента и обеспечения полного диффузионного взаимодействия между затвердевающим расплавом припоя и металлом изделия, а также для достижения определенных механических свойств паяных швов в процессе эксплуатации.

При пайке сплавов ВЖЛ12У и ЖС6У оптимальными режимами термообработки паяных соединений являются старение при 1000 °С в течение 3...4 ч после гомогенизирующего отжига при 1160 °С, которые обеспечивают двухкратное повышение прочности и длительной прочности паяных соединений при 900 °С. При этом ширина зазора (до 950 мкм) не оказывает заметного влияния на качество паяного шва, сформированного при температуре пайки 1220 °С и времени выдержки 20 мин.

В ИЦ "Пратт и Уитни Патон" разработаны технологические подходы ремонтной пайки (восстановления) деталей горячего тракта турбин из литейных никелевых сплавов 58КВТЮМБЛ-ВИ, ВЖЛ12У, ХН50ВНТЮБ, ЖС26-ВИ, ЖС26-НК и других после эксплуатации. Они базируются на применении модифицируемых кремний- и борсодержащих припоев с использованием порошковых наполнителей из никелевых сплавов.

Достигнуты улучшение смачиваемости расплавом припоя паяемых поверхностей, надежное проникновение и заполнение расплавом припоя зазоров и капилляров в поврежденных деталях. Разработанные системы комплексных кремний- и борсодержащих припоев являются универсальными для пайки деталей из никелевых суперсплавов. В зависимости от типа сплава изменяются лишь температура и длительность изотермической пайки изделий [25].

В ВИАМе продолжают разработки по совершенствованию жаропрочных никелевых сплавов с целью обеспечения процесса развития газотурбинных двигателей, рабочая температура которых достигает 1250 °С. Разработаны, паспортизированы и опробованы в промышленности литейные жаропрочные сплавы марки ВКНА (ВИАМ, конструкционные, никель-алюминиевые), литье деталей из которых осуществляют методом точного литья по выплавляемым моделям. По своим свойствам эти сплавы не уступают литейному сплаву ЖС6У. Наиболее жаропрочным материалом на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  является литой монокристаллический сплав марки ВКНА-25, не требующий упрочняющей термообработки, с повышенной рабочей температурой – до 1100 °С и ресурсом, в 3–4 раза превышающим ресурс других аналогичных сплавов. Пайка новых сплавов припоями на никелевой основе продолжает оставаться единственным средством получения соединений с высокой жаропрочностью, сравнимой с жаропрочностью паяемого сплава.

Применение интерметаллидных сплавов на титановой и никелевой основах позволяет значительно



улучшить технико-экономические показатели современных турбинных двигателей, снизить их массу на 25...30 %, увеличить в 3 раза рабочий ресурс [26].

Ввиду непрерывности и взаимосвязанности процессов разработки новых литейных сплавов [27, 28] и припоев для их соединения или ремонта изделий, следует ожидать появления в промышленности и новых припоев, обеспечивающих соединение сплавов нового поколения, и новых технологий литья и пайки, позволяющих получить структуру и свойства паяных швов сопоставимыми с паяемыми сплавами.

### Библиографический список

1. **Туфанов Д.Т.** Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов: справочник. М.: Металлургия, 1990.
2. **Химушкин Ф.Ф.** Жаропрочность сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1969.
3. **Росс И.В., Симс Ч.Т.** Сплавы на основе никеля: справ. пособие. В 2 кн. М.: Металлургия, 1995.
4. **Квасницкий В.Ф.** Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов в судостроении. Л.: Судостроение, 1986.
5. **Губин А.И.** Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1954.
6. **Пайка металлов: справочник /** Под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003.
7. **Шеин Ю.Ф.** Пайка хладостойким медно-марганцевым припоем изделий из стали 12X18H10T в "НПО Криогенмаш" // Сварочное производство. 1987. № 1.
8. **Хорунов В.Ф.** Сплавы системы Ni-Mn-Si как основа высокотемпературных припоев // Адгезия расплавов и пайка металлов. 1988. № 20.
9. **Головачев В.А., Елизаров Г.А.** Диффузионная сварка-пайка. Л.: Машиностроение. 1988.
10. **Диффузионная сварка материалов: справочник.** М.: Машиностроение, 1981.
11. **Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения /** В.А. Калинин и др. // Сварочное производство. 1996. № 1.
12. **Контактно-реактивная пайка нержавеющей сталей между собой и с другими материалами /** Н.М. Будник и др. // Сварочное производство. 1971. № 10.
13. **Чекунов И.П.** Композиционный припой для пайки коррозионно-стойких и жаропрочных сталей // Сварочное производство. 1996. № 3.
14. **Литейные жаропрочные сплавы.** Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006.
15. **Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления.** Киев: Наукова думка, 1982.
16. **Припой на основе системы Ni-Cr-Zr для пайки жаропрочных никелевых сплавов /** В.Ф. Хорунов и др. // Сварочное производство. 2008. № 11.
17. **Структура паяных соединений высоколегированных никелевых сплавов, полученных с использованием дугового нагрева /** В.Ф. Хорунов и др. // Автоматическая сварка. 2003. № 7.
18. **Технология получения неразъемных соединений из сплава ЖС36 /** А.Н. Афанасьев-Ходыкин и др. // Сварочное производство. 2010. № 7.
19. **Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32 /** В.И. Лукин и др. // Сварочное производство. 2012. № 5.
20. **Особенности кристаллизации комплекснолегированных припоев для высокотемпературной пайки жаропрочных никелевых сплавов /** В.В. Куренкова и др. // Автоматическая сварка. 2009. № 6.
21. **Кратковременная прочность паяных соединений никелевого сплава ВЖЛ12У при температурах 20 °С и 950 °С /** В.В. Куренкова и др. // Современная электрометаллургия. 2006. № 3.
22. **Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием боросодержащего припоя с добавкой кремния /** И.С. Малащенко и др. // Современная электрометаллургия. 2006. № 4.
23. **Механические свойства и структура паяных соединений литейного никелевого сплава ЖС26-ВИ /** В.В. Куренкова и др. // Современная электрометаллургия. 2007. № 2.
24. **Структура и прочностные свойства паяных соединений литейного никелевого сплава ЖС26-НК /** В.В. Куренкова и др. // Современная электрометаллургия. 2008. № 1.
25. **Ремонтная пайка деталей горячего тракта турбин //** Современная электрометаллургия. 2007. № 4. С. 26.
26. **Каблов Е.Н., Лукин В.И.** Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // Автоматическая сварка. 2008. № 11.
27. **Литейные жаропрочные сплавы нового поколения. Авиационные материалы /** Е.Н. Каблов и др. М.: ВИАМ, 2007.
28. **Авиационные материалы и технологии /** Под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012.

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

Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".

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

редакции журнала: [sboraka@mashin.ru](mailto:sboraka@mashin.ru), <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.

Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Солюшнина Л.Е.*

Сдано в набор 11.10.12 г. Подписано в печать 20.11.12 г. Формат 60×88 1/8.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,05. 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.