

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ**

СБОРКА

В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ



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

**4 2014
(165)**

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Воробьев Е.И., Дорофеев В.О. Реализация ориентирующего движения захватного устройства манипулятора поступательными приводами	3
Иванов А.А. Автоматизация подачи хрупких изделий с использованием струйной техники	6
Руднева Л.Ю. Технология сборки высокоточных сложнoproфильных деталей с упругим элементом по равножесткости	9

Технологическая оснастка для сборки

Ерохин В.В. Систематизация станочных приспособлений и методология определения их проектных параметров и эксплуатационных свойств	14
Розинов А.Я., Догадин А.В., Бескровный А.Ю. Сборка соединений обшивки корпусов судов с применением специализированных сборочных устройств	20

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Вытнов Ю.В., Александрин А.Г., Голубев С.В., Герасимов Е.А., Медведев Н.П. Опыт применения электронно-лучевой сварки при изготовлении теплообменного оборудования в ОАО "ОКБМ Африкантов"	27
Карабанов В.В., Бахоров И.О. Пайка теплообменников	30

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
Tel.: (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.

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

Редакционный совет

МОСКВА	А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
А.С. ВАСИЛЬЕВ	А.В. МЕДАРЬ, к.т.н.
(главный редактор), д.т.н., проф.	Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.	В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.	Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.	А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.	А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.	Г.А. ЯРКОВ, инж.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД	А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.	А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
БРЯНСК	А.П. ФОТ, д.т.н., проф.
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.	РЫБНИК
ВЛАДИВОСТОК	В.Ф. БЕЗЬЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН	В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.	А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.
В.М. КОРNIЕНКО, к.т.н.	САМАРА
ВОЛГOGРAD	М.А. ЕВДОКИМОВ, д.п.н., проф.
В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.	Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.	Г.А. КУЛАКОВ, д.т.н.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН	В.А. НИКОЛАЕВ, к.т.н., проф.
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ИЖЕВСК	В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н.
И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.	Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.	ТОЛЬЯТИ
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.	А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.
КАЗАНЬ	ТУЛА
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.	В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.
КОВРОВ	ХАБАРОВСК
Ю.Э. ЖИТИНКОВ, д.т.н., проф.	В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.
КОЛОМНА	Украина
Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.	КИЕВ
КОМСОМОЛЬСК- НА-АМУРЕ	А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.	В.А. МАТВIЕНКО, к.т.н.
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.	ДОНЕЦК
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.	А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ	СЕВАСТОПОЛЬ
С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н., проф.	Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.	Беларусь
НИЖНИЙ НОВГОРОД	МИНСК
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.	В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
ОМСК	М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.
В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.	ГОМЕЛЬ
ОРЕЛ	В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.
Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.	Израиль
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.	В.М. БЕДРИН, инж.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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

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

4 2014
(165)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Vorobyev E.I., Dorofeyev V.O. Realization of focusing movement of the gripping device of the manipulator by forward drive gears	3
Ivanov A.A. The automation of the supply of fragile products using inkjet equipment	6
Rudneva L.Yu. Technology of assembly of high-precision figurine details with an elastic element on equal rigidity	9

Technological equipment for assembly

Erokhin V.V. Systematization of machine adaptations and methodology of determination of their design parameters and operational properties	14
Rozinov A.Ya., Dogadin A.V., Beskrovny A.Yu. Assembly of connections of a covering of cases of vessels with application specialized assemblers	20

Assembly welding works. Soldering

Vytnov Yu.V., Aleksandrin A.G., Golubev S.V., Gerasimov E.A., Medvedev N.P. Electron-beam welding usage experience gained by JSC "Afrikantov OKBM" manufacturing heat-exchange equipment	27
Karabanov V.V., Bokhorov I.O. Soldering of heat exchangers	30

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.

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

Editors

MOSCOW

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

VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL

V.G. KARABAN'

V.I. LYSAK

V.M. TRUKHANOV

IZHEVSK

I.V. ABRAMOV

B.A. YAKIMOVICH

V.G. OSETROV

KAZAN

R.I. ADGAMOV

KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA

Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN

V.I. SCHPORT

A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY

S.V. DMITRIEV

R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

OMSK

V.N. KOSTIUKOV

OREL

Yu.S. STEPANOV

G.A. KHLARLOV

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

ISRAEL

V.M. BEDRIN

POLAND

P.LEBKOVSKI

E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:

Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ

УДК 621.757

Е.И. Воробьёв, д-р техн. наук, В.О. Дорофеев
(Институт машиноведения РАН им. А.А. Благонравова)
E-mail: katev@bk.ru

Реализация ориентирующего движения захватного устройства манипулятора поступательными приводами

Рассмотрена задача о реализации ориентирующего движения схвата манипулятора с помощью поступательных приводов. Получены формулы, связывающие углы поворота схвата с поступательными перемещениями штока приводов. Данная схема в последнее время получает применение в сборочных промышленных роботах.

The task about realization of focusing gripper movement the manipulator by means of forward drive gears was considered. Received formulas connecting angles of gripper rotation with forward conveyances of a rod of drive gears. This scheme receives recently application in assembly industrial robots.

Ключевые слова: сборочный промышленный робот, ориентирующее движение схвата, поступательный привод.

Keywords: assembly industrial robot, focusing gripper movement, forward drive gear.

Рассмотрим реализацию ориентирующих движений захватного устройства (ЗУ) манипулятора с помощью приводов поступательного движения. Вначале рассмотрим движение ЗУ с одной степенью свободы.

Пусть ЗУ совершает поворот на угол Ψ вокруг оси OZ с помощью тяги AB , причем точка A закреплена в неподвижной системе координат $OXYZ$, а точка B – на подвижном звене, с которым связана система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ (см. рисунок).

В системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ точка B имеет координаты:

$$\|X_B^{(1)}\| = \|l_1, 0, 0\|^T,$$

где T – знак транспонирования.

В неподвижной системе координат $OXYZ$ координаты точки B равны:

$$\|X_B\| = L_{01} \|X_B^{(1)}\|^T,$$

где $\|L_{01}\|$ – матрица поворота вокруг оси Z :

$$L_{01} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда координаты точки B в системе $OXYZ$

$$\|X_B\| = \|l_1 \cos \Psi, l_1 \sin \Psi, 0\|^T.$$

Координаты точки A в системе $OXYZ$

$$\|X_A\| = [R_{1, 0, 0}]^T.$$

Тогда переменная длина штока AB

$$S_1^2 = (l_1 \cos \Psi - R)^2 + l_1^2 \sin \Psi^2 + h^2.$$

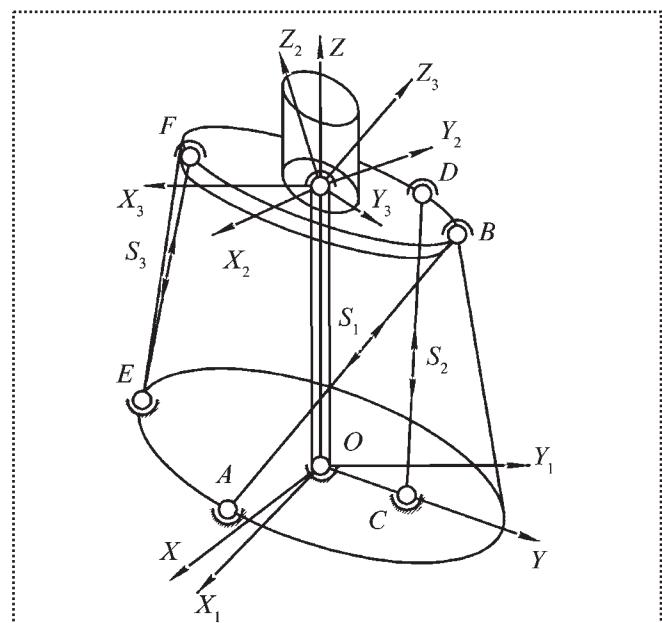


Схема ориентирования схвата манипулятора поступательными приводами



Отсюда получаем формулу для определения угла поворота схвата:

$$\Psi = \arccos \left[\frac{S_1^2 + R_1^2 - h^2}{2 l_1 R_1} \right], \quad (1)$$

где l_1 и R_1 – координаты точек B и A соответственно.

Выражение, связывающее скорость поворота ЗУ со скоростью движения в поступательном приводе, получим дифференцируя по времени формулу (1):

$$\dot{\Psi} = \dot{S}_1 \frac{S_1}{l_1 R_1 \sin \Psi}. \quad (2)$$

Связь между усилием привода и моментом поворота ЗУ получим на основе принципа возможных перемещений:

$$M_\Psi = F_1 \frac{l_1 R_1 \sin \Psi}{S_1}, \quad (3)$$

где M_Ψ – момент поворота ЗУ;

F_1 – усилие в тяге S_1 .

Рассмотрим далее реализацию движения ЗУ, имеющего две степени свободы.

В этом случае к приводу AB добавляется привод CD .

Точка закрепления связи C на неподвижном звене имеет координаты:

$$\|X_c\| = \|0, R_2, 0\|^T.$$

Точка D закрепления штока привода на подвижном звене имеет следующие координаты в системе $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, связанной с подвижным звеном:

$$\|X_D^{(2)}\| = \|0, l_2, 0\|^T.$$

В последних двух формулах l_2 и R_2 – координаты точек D и C соответственно. Тогда координаты точки D в неподвижной системе координат $OXYZ$ можно записать в виде:

$$\|X_D\| = L_{01} L_{12} \|X_D^{(2)}\|^T, \quad (4)$$

где L_{01} , L_{12} – матрицы перехода от системы $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ к системе $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ и от системы $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ к системе $OXYZ$.

Эти матрицы имеют вид:

$$L_{01} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$L_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$

Используя выражения (4) и (5), получим следующие выражения координат точки D в неподвижной системе координат:

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_2 & \sin \Psi & \cos \theta \\ l_2 & \cos \Psi & \cos \theta \\ l_2 \sin \theta & & \end{bmatrix}.$$

Расстояние между точками C и D равно:

$$(X_D - X_C)^2 + (Y_D - Y_C)^2 + (Z_D - Z_C)^2 = S_2^2. \quad (6)$$

После преобразования получим:

$$S_2^2 = R_2^2 + l_2^2 - 2l_2 R_2 \cos \Psi \cos \theta. \quad (7)$$

где S_2 – длина штока CD ;

$$\theta = \arccos \left[\frac{S_2^2 - R_2^2 - l_2^2}{2l_2 R_2 \cos \Psi} \right].$$

Подставляя в уравнение (7) $\cos \Psi$, получим длину штока S_2 :

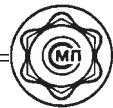
$$S_2 = \sqrt{R_2^2 + l_2^2 - 2l_2 R_2 \cos \theta \left(\frac{S_1^2 - l_1^2 - R_1^2 - h^2}{2l_1 R_1} \right)}. \quad (8)$$

Дифференцируя по времени выражение (7), найдем связь между скоростью изменения длины штока S_2 со скоростью угла θ :

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 &= R_2 l_2 \cos \Psi + R_2 l_2 \cos \theta \sin \Psi \cdot \dot{\Psi} = \\ &= R_2 l_2 [\sin \theta \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \Psi + \cos \theta \sin \Psi \cdot \dot{\Psi}]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{S}_1 = -\frac{\dot{\Psi}}{S_1} l_1 R_1 \sin \Psi = \dot{\Psi} \frac{l_1 R_1 \sin \Psi}{S_1}. \quad (10)$$

Формулы определяют скорость изменения длин штоков S_1 и S_2 при заданных скоростях изменения углов Ψ , θ и их значения.



Рассмотрим вопрос о реализации угловых перемещений ЗУ с тремя степенями подвижности с помощью тяговых приводов или искусственной мышцы.

Положение подвижной системы координат $OX_3Y_3Z_3$ относительно неподвижной будет определяться тремя углами Эйлера – Ψ, θ, φ .

Соответствующие матрицы поворота имеют вид:

$$L_{01} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad L_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$L_{23} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

К двум предыдущим приводам AB и CD добавим привод EF .

$$\dot{S}_3 = \frac{R_3 l_3 [\dot{\Psi}(-\cos \varphi \cos \Psi - \sin \Psi \cos \theta) + \dot{\varphi}(-\sin \varphi \sin \Psi + \cos \Psi \cos \theta \cos \varphi) - \dot{\theta} \sin \varphi \sin \theta \cos \Psi]}{S_3}.$$

Координаты точки F в системе координат $OX_3Y_3Z_3$ имеют вид:

$$\| X_F \| = \| l_3, 0, 0 \|^T.$$

Здесь и далее l_3 и R_3 – координаты точек E и F .

В неподвижной системе координаты точки F имеют вид:

$$\| X_F \| = \| L_{01}, L_{32} \| X_F^{(3)} \|.$$

Подставляя выражение для матриц поворота в последнее уравнение, получим координаты точки F в неподвижной системе координат:

$$X_F = l_3 (\cos \varphi \cos \Psi - \sin \varphi \cos \theta \sin \Psi);$$

$$Y_F = l_3 (\cos \varphi \sin \Psi + \sin \varphi \cos \theta \cos \Psi);$$

$$Z_3 = l_3 \sin \varphi \sin \theta.$$

Координаты точки E в неподвижной системе координат примем в виде:

$$\| X_E \| = \| 0, R_3, 0 \|^T.$$

Запишем расстояние между точками E и F в виде:

$$(X_E - X_F)^2 + (Y_E - Y_F)^2 + (Z_E - Z_F)^2 = S_3^2,$$

где S_3 – длина тяги EF .

Подставляя выражения для координат в последнее уравнение, получим следующее выражение для длины тяги S_3 :

$$S_3 = [l_3^2 + R_3^2 - 2R_3 l_3 (\cos \varphi \sin \Psi + \sin \varphi \cos \theta \cos \varphi)]^{\frac{1}{2}}.$$

Дифференцируя по времени выражение (11), получим формулу для скорости изменения длины штока S_3 :

Полученные выражения для определения длины и скорости изменения штоков приводов позволяют реализовать заданное ориентирующее движение ЗУ манипулятора с тремя степенями подвижности.

Библиографический список

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988. 392 с.
2. Козырев Ю.Г. Установка захватных устройств и инструментов на конечном звене манипулятора при сборке изделий машиностроения и приборостроения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 12. С. 11–21.
3. Воробьев Е.И., Козырев Ю.Г., Царенко В.И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

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

Автоматизация подачи хрупких изделий с использованием струйной техники

Показан пример применения струйной техники для производственных систем автоматической подачи деталей с низкими прочностными характеристиками в технологическую машину, исключающего механические повреждения объектов в процессе манипулирования.

The example of application of the inkjet equipment for production systems of the automatic supply the details with low strength characteristics into technological machine excepting mechanical damages of the objects in the process of manipulating is shown.

Ключевые слова: струйный пневмоподъемник, струйный захват манипулятора, неповреждаемое манипулирование.

Keywords: inkjet pneumotray, inkjet grip of the manipulator, non-damaged manipulating.

Принцип функционирования производственной системы на основе струйной техники покажем на примере автоматизации подачи хрупких полупроводниковых пластин в установку зондового контроля. В пневматической системе подачи используют струйные лотки и манипулятор со струйным (бесконтактным) захватом (рис. 1). В этой системе круглые пластины 5 из входной этажерочной кассеты 6 выгружаются на подводящий струйный лоток 2, с которого их забирает струйным захватом манипулятор 4 и переносит на технологическую установку 3 для проведения зондового контроля. После контроля манипулятор выгружает пластины на отводящий струйный пневмоподъемник 2, который устанавливает их на полки выходной кассеты 1. Кассеты 1, 6 совершают шаговое движение (при выгрузке пластин из кассеты – вниз, а при загрузке их в кассету – вверх).

Шаг между полками 2 (рис. 2) в кассете 1 выбран с таким расчетом, чтобы в зазоре могла разместиться концевая часть 3 струйного лотка. Средняя часть полок выбрана в кассете по ширине струйного лотка. Поэтому пластины 4 в кассете базируются на боковых полках 2.

При перемещении на шаг выходной кассеты вверх (рис. 2, а) пластина 4 будет снята боковыми полками 2 с перфорированной крышки отводящего струйного лотка 3. При перемещении на шаг входной кассеты вниз пластина снимается с боковых полок и оказывается на крышке подводящего струйного лотка (рис. 2, б).

Для перемещения объектов с развитой опорной поверхностью по горизонтальному струйному лотку в его крышке сверлят отверстия, оси которых наклонены в сторону движения детали на угол α (рис. 3, а). Давление, необходимое для создания воздушной прослойки

$$p_i = \frac{G}{S},$$

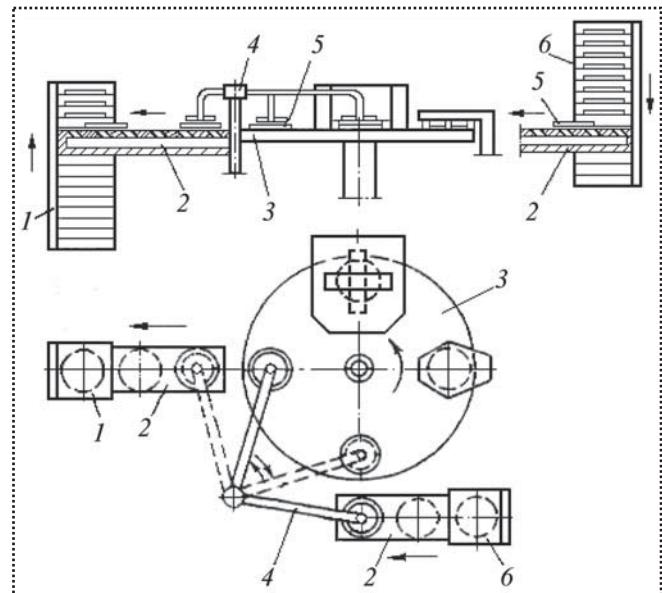


Рис. 1. Система на основе струйной техники для автоматизации подачи хрупких полупроводниковых пластин в установку зондового контроля:

1, 6 – выходная и входная кассеты; 2 – струйный пневмоподъемник; 3 – установка зондового контроля; 4 – манипулятор с бесконтактным струйным захватом; 5 – пластина

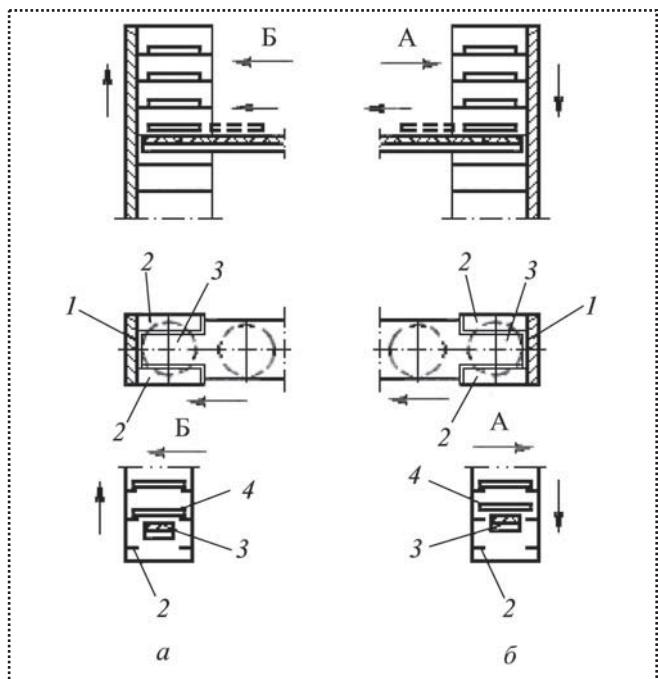


Рис. 2. Загрузка пластин в выходную кассету (а) и выгрузка пластин из входной кассеты (б):

1 – кассета; 2 – боковые полки; 3 – концевая часть струйного лотка; 4 – пластина

где G – вес детали;

S – площадь опорной поверхности детали.

На движущуюся пластину действуют следующие силы (см. рис. 3, а):

- вязкого трения F_{τ} ;
- давления струй на кромку пластины F_k ;
- сопротивления движению F_c ;
- тяжести G ;
- вертикальная составляющая давления воздушного потока R .

Считая скорость v_d пластины малой, силой $F_c \sim v_d^2$ можно пренебречь [2].

С учетом этого напишем дифференциальное уравнение движения пластины в проекции на ось x :

$$m \ddot{x} = F_{\tau} + F_k.$$

Поскольку скорость движения пластины в струйном лотке может быть значительной, то останов ее в технологической позиции с помощью механического упора сопровождается ударом с возможным повреждением или разрушением полупроводниковой пластины диаметром 150 мм и толщиной 0,4 мм. Используя встречные струи воздуха для торможения пластины, можно получить режи-

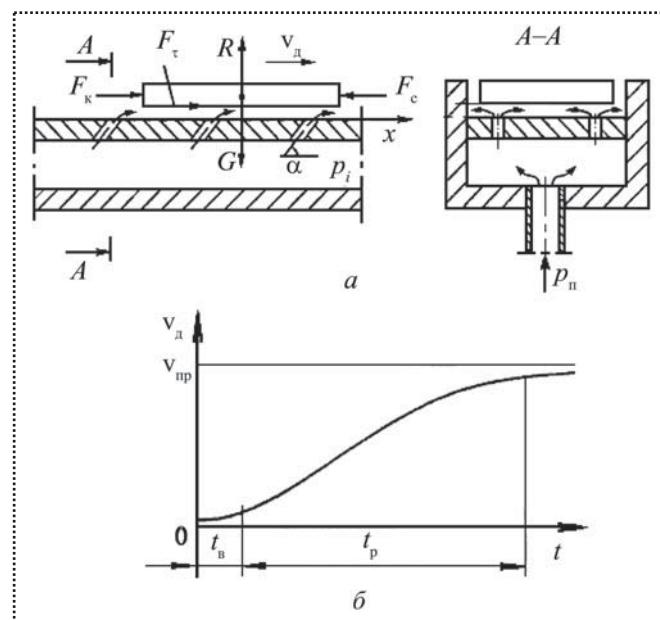


Рис. 3. Схема перемещения детали по горизонтальному струйному лотку на воздушной прослойке (а) и график изменения скорости детали v_d (б):

p_n – давление питания сжатого воздуха; v_{pr} – предельная скорость; t_b , t_p – время выстоя и разгона детали

мы ее движения практически с любой заданной постоянной скоростью и при необходимости безударный останов пластины.

Существуют различные схемы систем торможения. В одной из них перемещение пластин осуществляется с помощью верхних сопел 4, размещенных на направляющей 5 (рис. 4). Частично или на всей длине струйного лотка 1 делают вертикальные сопла 2 с целью повышения эффективности торможения. Конструкция системы позволяет перемещать сопла 4 вдоль трассы по направляющей 5 и

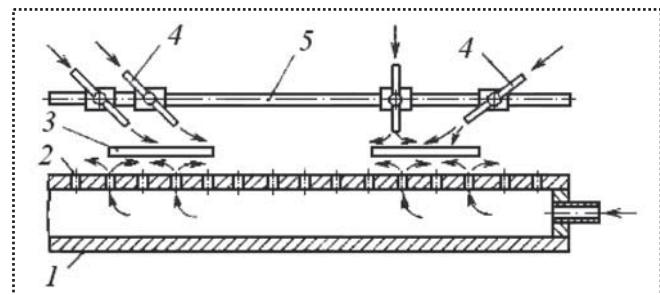


Рис. 4. Торможение хрупких пластин с помощью подвижных сопел с изменяемым углом наклона:

1 – струйный лоток; 2 – вертикальные сопла; 3 – пластина; 4 – верхние сопла; 5 – направляющая

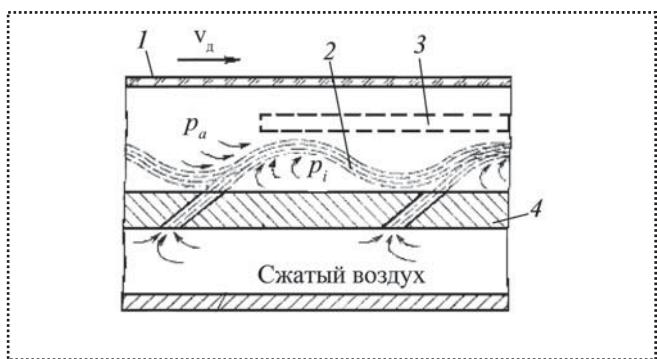


Рис. 5. Образование Коанд-эффекта в закрытом струйном лотке:
1 – верхняя крышка; 2 – струя; 3 – пластина; 4 – струйный лоток

изменять их угол наклона. Это достаточно гибкая система, так как она позволяет фактически управлять скоростью движения объекта на любом участке трассы.

С целью предохранения не только нижней, но и верхней поверхности пластины 3 (рис. 5) от возможных повреждений при ее перемещении применяют струйный лоток 4 закрытого типа с верхней крышкой 1 вдоль всего тракта. В этом лотке шаг между соплами и другие параметры выбирают из условия появления эффекта Коанда, который заключается в поджиме наклонных струй 2 к поверхности лотка.

Поджим струи 2 к лотку 4 происходит за счет эжектирующего действия струи и возникающей при этом разности давлений $\Delta p = p_a - p_i$ в области над (p_a) и под (p_i) струей. Правильно выбранные конструкция и режим обеспечивают перемещение пластин без соприкосновения с нижней и с верхней поверхностями струйного лотка.

Манипулятор, осуществляющий перегрузку пластин, снабжен бесконтактным струйным захватом, который имеет существенное преимущество перед вакуумным, так как он не соприкасается с функциональными поверхностями пластины, исключая тем самым их повреждение. Струйный захват 1 (рис. 6), или так называемый захват Бернули, захватывает пластину 3 за счет эжектирующего действия радиального воздушного потока, протекающего в узкой щели между торцем захвата и поверхностью пластины. Смещению пластины относительно захвата препятствуют эластичные ограничители 2.

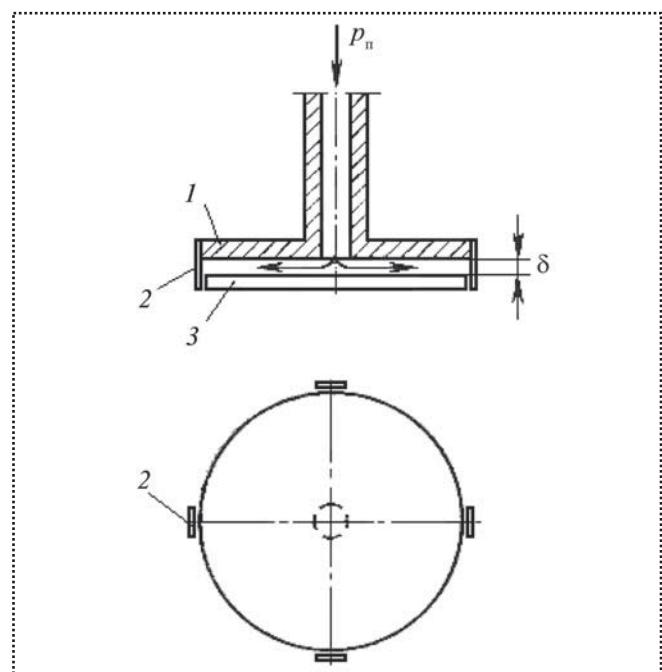


Рис. 6. Размещение хрупкой пластины на струйном захвате:
1 – струйный захват; 2 – эластичные ограничители; 3 – пластина; p_n – давление питания сжатого воздуха; δ – зазор между захватом и пластиной

Вопросы расчета струйного захвата и определения равновесного и устойчивого положения детали на захвате рассмотрены в работах [1, 2].

Вывод

Представленное магазинное загрузочное устройство на основе струйной техники позволяет полностью исключить брак по механическим повреждениям хрупких полупроводниковых пластин в процессах манипулирования, связанных с их транспортированием, накоплением и базированием на рабочих позициях. При выполнении подобных операций оператором вручную (обычно с помощью пинцета) не удается избежать повреждения пластин, включая их поломку. Кроме того, у оператора быстро наступает утомление от однообразного нетворческого труда.

Библиографический список

1. Иванов А.А. Автоматизированные сборочные системы: учебник. Н.Новгород: НГТУ, 2007. 347 с.
2. Иванов А.А. Теоретические основы процессов манипулирования объектами обработки и сборки. Н.Новгород: НГТУ, 2009. 257 с.



УДК 621.981

Л.Ю. Руднева, канд. техн. наук (МГТУ "МАМИ")
E-mail: rudnewal@list.ru

Технология сборки высокоточных сложнопрофильных деталей с упругим элементом по равножесткости

Одним из направлений современной техники является создание микроэлектромеханических систем. Современные методы измерения жесткости высокоточных вибрационных пластин специальных агрегатов и приборов базируются на фундаментальной теории упругости. Проблема миниатюризации в производстве агрегатов специальных изделий, создание микро- и наноагрегатов предъявляют особые требования к технологии сборки этих изделий. Предложена методика расчета таких вибрационных пластин методом конечных элементов, являющимся одним из приближенных методов расчета теории упругости.

Creation of microelectromechanical systems is the direction of the modern techniques. The modern measurement's rigidity methods of high-precision vibration plates for special aggregates and instruments are based on the fundamental theory of elasticity. The miniaturization problem in such aggregates production and micro- and nanoaggregates creation makes special demands to the technology. The design procedure of such vibration plates by the finite-element method is offered. It is one of the approximate calculation methods of the elasticity theory.

Ключевые слова: технология, сборка, упругий элемент, равная жесткость.

Keywords: technology, assembly, elastic element, equal rigidity.

Плоские сложнопрофильные пластины, защемленные по внешнему контуру и содержащие внутренний колеблющийся контур, выполняемые из хрупких материалов (кварц, ситалл, стекло и др.), испытывают внешнюю нагрузку от инерционных сил. Детали имеют сложный профиль выреза для намотки катушек, находящихся под напряжением.

Принцип работы такой катушки основан на возникновении ЭДС при отклонении внутренней пластины (ВП) от заданного положения. Предпо-

лагается, что деформация внутреннего контура ВП происходит под воздействием внешних сил, вызванных ускорением.

Предложена методика расчета таких ВП методом конечных элементов (МКЭ), являющимся одним из приближенных методов расчета теории упругости [1, 2, 5–7]. Значение приближенных методов для инженерной практики становится тем больше, чем активнее внедряются в теорию и практику вычислительная техника и новейшие информационные технологии [5, 7].

Теорией упругости называют раздел механики сплошной среды, который занимается изучением поведения упругих твердых тел при их нагружении. При этом деформируемая среда считается однородной и изотропной, т.е. ее упругие свойства одинаковы во всех направлениях. Кроме того, предполагается, что среда деформируется линейно (для материала среды выполняется закон Гука), причем перемещения и деформации достаточно малы.

В общем случае расчет напряженно-деформируемого состояния в точке (расчет на прочность и жесткость) можно провести с помощью системы фундаментальных уравнений теории упругости [7]. Получение точного аналитического решения этих уравнений для расчета на прочность и жесткость вибрационных пластин – сложная процедура. По этой причине аналитические методы имеют ограниченное применение. Единственным выходом из такого положения является использование приближенных методов, реализация которых возможна с помощью современной вычислительной техники.

Анализ работ [1, 2, 4, 6], описывающих различные методики расчета пластин, защемленных по контуру и деталей типа "пружина" показал, что решение дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих ВП специальных агрегатов и приборов, может быть выражено, как

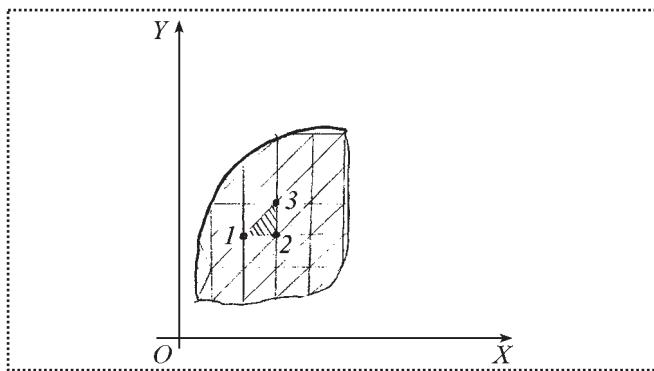


Рис. 1. Фрагмент разбивки пластины на конечные элементы – треугольники

правило, в рядах. Учитывая присущие вибрационным пластинам способ крепления, сложный профиль сечения и особенности применяемых материалов, сделан вывод о том, что необходимую точность расчета на жесткость обеспечит лишь МКЭ в сочетании с применением вычислительной техники.

В основе этого метода лежит представление плоских ВП в виде набора некоторых простых с геометрической точки зрения фигур, называемых *конечными элементами*, взаимодействующих между собой только в узлах [5, 7]. Так как ВП специальных агрегатов и приборов имеют соотношение длины и толщины более 5, его удобно представить множеством треугольных элементов (рис. 1, 2). Рассмотрим конечный элемент, координаты узлов 1, 2, 3 которого $x_1, y_1; x_2, y_2$ и x_3, y_3 . После приложения внешней силы внутренняя точка этого элемента с координатами x, y занимает новое положение,

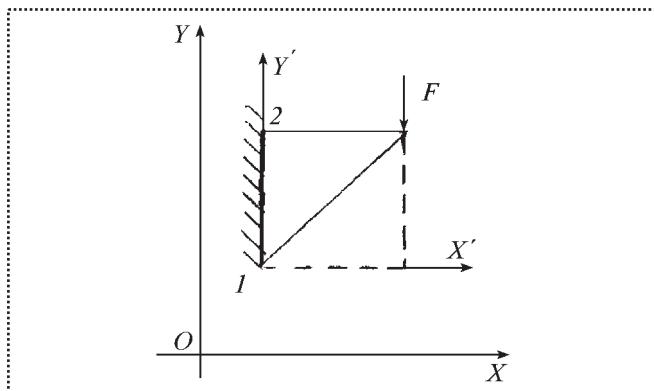


Рис. 2. Разбитие на конечные ВП:
1 – первый конечный элемент; 2 – второй конечный элемент

ние, перемещаясь в направлении координатных осей X и Y соответственно на расстояние u и v , причем в пределах одного конечного элемента эти перемещения представляются в виде линейных функций координат:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2 x + a_3 y; \\ v(x, y) &= a_4 + a_5 x + a_6 y, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_1-a_6 – постоянные коэффициенты. Или в матричной форме:

$$\vec{u}(x, y) = [L(x, y)] \vec{a}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \vec{u}(x, y) &= \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix}; \\ [L(x, y)] &= \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix}; \\ \vec{a} &= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]. \end{aligned}$$

Как отмечалось авторами работ [5, 7], задание перемещений в виде линейных функций (1) обеспечивает сшивку этих функций на границах соседних элементов. Действительно, линейность перемещений означает и их линейность вдоль границы элемента.

Подставляя в выражение (2) координаты узловых точек, получим

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix},$$

или

$$\vec{u} = [L(x, y)] \vec{a}, \quad (3)$$

где $\vec{u} = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3]^T$.

Здесь T – знак транспонирования матрицы.

В системе уравнений (3) в качестве неизвестных можно рассматривать постоянные коэффициенты.



Решив систему (3) с помощью формул Крамера, имеем:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\begin{bmatrix} u_1 & x_1 & y_1 \\ u_2 & x_2 & y_2 \\ u_3 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}}{2\Delta}; \quad a_2 = \frac{\begin{bmatrix} 1 & u_1 & y_1 \\ 1 & u_2 & y_2 \\ 1 & u_3 & y_3 \end{bmatrix}}{2\Delta}; \\ a_3 &= \frac{\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}}{2\Delta}; \quad a_4 = \frac{\begin{bmatrix} v_1 & x_1 & y_1 \\ v_2 & x_2 & y_2 \\ v_3 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}}{2\Delta}; \\ a_5 &= \frac{\begin{bmatrix} 1 & v_1 & y_1 \\ 1 & v_2 & y_2 \\ 1 & v_3 & y_3 \end{bmatrix}}{2\Delta}; \quad a_6 = \frac{\begin{bmatrix} 1 & x_1 & v_1 \\ 1 & x_2 & v_2 \\ 1 & x_3 & v_3 \end{bmatrix}}{2\Delta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь Δ – определитель матрицы системы, численно равный площади конечного элемента:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Как показывает анализ работ [5, 7], тот же самый результат получается и другим способом: поскольку определитель матрицы отличен от нуля, то единственное решение системы (3) есть произведение обращенной матрицы системы и вектора.

Использование формул (4) и (5) приводит к выражению для определения поля перемещений произвольной точки данного конечного элемента:

$$\begin{aligned} \vec{u}(x, y) &= \frac{1}{2\Delta} [(a_1 + b_1 x + c_1 y) u_1 + \\ &+ (a_2 + b_2 + c_2 y) u_2 + (a_3 + b_3 + c_3 y) u_3], \end{aligned} \quad (6)$$

где $a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2$; $b_1 = y_2 - y_3$; $c_1 = x_3 - x_2$, а остальные коэффициенты находят путем циклической перестановки индексов 2 и 3. В матричной форме уравнение (6) переписывается как

$$\vec{u}(x, y) = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x, y) u_i. \quad (7)$$

Функция ψ_i , имеющая вид

$$\psi_i = \frac{1}{2\Delta} (a_i + b_i x + c_i y), \quad (8)$$

называется *функцией формы*.

Компоненты вектора-столбца ε' относительно деформации связаны с перемещением соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \\ \varepsilon_z &= \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{\sigma} \end{aligned} \right\},$$

$$\text{поэтому } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \end{bmatrix}.$$

С другой стороны, используя выражения (7) и (8), можно написать

$$\bar{\varepsilon}(x, y) = \sum_{i=1}^3 [\beta_i] \vec{u} = [\beta] \vec{u},$$

где \vec{u} – вектор узловых перемещений;

$$[\beta_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial y} & \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$[\beta] = \{[\beta_1] \ [\beta_2] \ [\beta_3]\};$$

$$[\beta] = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix}.$$



Перемещения связаны с соответствующими напряжениями законом Гука, который для случая плоского нагружения записывается в виде

$$\vec{\sigma} = [E] \vec{\varepsilon}, \quad (9)$$

где σ — нормальные напряжения, возникающие в сечении, Па;

E — модуль продольной упругости, Па;

ε — продольная деформация;

$$[E] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Уравнение (9) с учетом выражения (7) принимает следующий вид:

$$\vec{\sigma} = [E][\beta]\vec{u}. \quad (11)$$

Воспользуемся выражением для потенциальной энергии деформации элементарного объема [7]:

$$dV = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) dx dy dz.$$

Тогда эта энергия с учетом формулы (11) определяется из очевидного уравнения

$$V = \frac{1}{2} \vec{\sigma}^\top \vec{\varepsilon} \Delta V = \frac{1}{2} \vec{u}^\top [\beta]^\top [E][\beta] \vec{u} \Delta V. \quad (12)$$

Но энергия деформации элемента может быть рассчитана иначе — как работа внешних сил. В качестве внешней нагрузки на элемент объема можно принять реакции, приложенные к граням этого элемента, тогда

$$V = \frac{1}{2} \vec{u}^\top [\beta]^\top [E][\beta] \vec{u} \Delta V = \frac{1}{2} \vec{u}^\top \vec{R}, \quad (13)$$

где R — реакции, приложенные к граням элемента со стороны соседних элементов.

Из уравнения (13) легко определить реакции, выполнив ряд очевидных сокращений, тогда

$$\vec{R} = [K] \vec{u}, \quad (14)$$

где

$$[K] = [\beta]^\top [E][\beta] \Delta V. \quad (15)$$

Уравнение (14) представляет собой обычное уравнение равновесия, а матрица $[K]$ является квадратной размерности 6×6 . Она называется *матрицей жесткости* конечного элемента.

Авторами работы [5] рассмотрено получение матрицы жесткости методом конечных элементов для стержня с постоянным по длине поперечным сечением, воспринимающего обобщенную силу, которой соответствует обобщенное перемещение. Упругие свойства отдельных элементов, на которые разбиваются конструкции, описываются матрицей податливости или матрицей жесткости в зависимости от того, какой метод расчета применяется — метод сил или метод перемещений. Матрицы, определяющие связь между узловыми силами и узловыми перемещениями рассматриваемого конечного элемента примут вид:

$$\vec{u}^e = [\vec{\delta}^e] \{ \vec{F}^e \} \quad \text{или} \quad \{ \vec{F}^e \} = [\vec{K}^e] \{ \vec{u}^e \}, \quad (16)$$

где $[\vec{\delta}^e]$ — матрица коэффициентов податливости стержня длиной l , площадью поперечного сечения A , воспринимающего только продольную силу и изготовленного из материала с модулем упругости E . Порядок матрицы податливости отдельного элемента (стержня) определяется числом независимых сил, приложенных к нему.

Так как матрица жесткости обратна по отношению к матрице податливости, т.е.

$$[\vec{K}^e] = [\vec{\delta}^e]^{-1},$$

то, сопоставив выражение (16) и (14), можно увидеть что выражение (16) является общим для любого вида деформированного состояния тела.



Раскроем матрицу $[K]$, выразив ее из выражения (14):

$$[K] = \frac{E \delta}{4(1-\mu^2)A} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix},$$

где A – площадь поперечного сечения, мм^2 ;

E – модуль продольной упругости, Па;

δ – толщина пластины, мм;

μ – коэффициент Пуассона.

Элементы этой матрицы получают путем решения матричного уравнения (15):

$$K_{11} = y_{23}^2 + (1-\mu)/2 x_{32}^2 ;$$

$$K_{12} = K_{21} = (1+\mu)/2 x_{32} y_{23} ;$$

$$K_{13} = K_{31} = y_{23} y_{31} + (1+\mu)/2 x_{32} y_{13} ;$$

$$K_{14} = K_{41} = \mu y_{23} x_{32} + (1-\mu)/2 x_{32} y_{31} ;$$

$$K_{15} = K_{51} = y_{21} y_{23} + (1+\mu)/2 x_{32} y_{21} ;$$

$$K_{16} = \mu y_{23} x_{21} + (1-\mu)/2 x_{32} y_{12} ;$$

$$K_{22} = x_{32}^2 + (1-\mu)/2 y_{23}^2 ;$$

$$K_{23} = K_{32} = \mu y_{32} x_{31} + (1-\mu)/2 x_{13} y_{23} ;$$

$$K_{24} = K_{42} = x_{13} x_{32} + (1-\mu)/2 y_{23} y_{31} ;$$

$$K_{25} = K_{52} = \mu x_{32} y_{12} + (1-\mu)/2 x_{21} y_{23} ;$$

$$K_{26} = K_{62} = x_{32} x_{21} + (1-\mu)/2 y_{12} y_{23} ;$$

$$K_{33} = y_{31} + (1-\mu)/2 x_{21} x_{13} ;$$

$$K_{34} = K_{43} = (1+\mu)/2 x_{13} y_{31} ;$$

$$K_{35} = K_{53} = y_{31} y_{12} + (1-\mu)/2 x_{21} x_{13} ;$$

$$K_{36} = K_{63} = \mu x_{21} y_{31} + (1-\mu)/2 x_{13} y_{12} ;$$

$$K_{44} = x_{13}^2 + (1-\mu)/2 y_{31}^2 ;$$

$$K_{45} = K_{54} = \mu x_{13} y_{12} + (1-\mu)/2 x_{21} y_{31} ;$$

$$K_{46} = K_{64} = x_{21} x_{13} + (1-\mu)/2 y_{31} y_{12} ;$$

$$K_{66} = x_{21}^2 + (1-\mu)/2 x_{12}^2 .$$

Библиографический список

1. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.
2. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян и др. М.: Изд-во АСВ, 1995. 568 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1998. 480 с.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.
5. Работотехнические системы и комплексы: учебн. пособие / И.И. Мачульский и др. М.: Транспорт, 1999. 446 с.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1972. 544 с.
7. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. М.: АРМ, 2000. 472 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ СБОРКИ

УДК 621.9.06.004

В.В. Ерохин, д-р техн. наук (Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского)
E-mail: erohinvv@mail.ru

Систематизация станочных приспособлений и методология определения их проектных параметров и эксплуатационных свойств

Рассмотрена систематизация станочных приспособлений по функциональному назначению и показателям качества. Описана методология определения проектных параметров и эксплуатационных свойств станочных приспособлений.

Systematization of machine adaptations on a functional purpose and quality indicators is considered. The methodology of determination of design parameters and operational properties of machine adaptations is described.

Ключевые слова: станочное приспособление, эксплуатационное свойство, качество.

Keywords: machine-tool accessorie, operational propertie, quality.

Для обеспечения заданного качества обрабатываемых поверхностей заготовки с минимальными временными и стоимостными затратами необходимо обеспечить точность, надежность и долговечность станочного приспособления. Систематизация станочных приспособлений по функциональному назначению позволяет системно подойти к изучению их параметров качества, что позволит сформировать математически formalизованные модели по обеспечению и повышению качества приспособлений, исходя из критериев минимальной себестоимости и максимальной производительности изготовления изделия.

Основными функциями приспособлений являются:

- 1) базирование (статическое и поднастраиваемое);
- 2) закрепление;
- 3) направление – обеспечение заданного направленного движения режущего инструмента и элементов приспособления;
- 4) обеспечение дополнительной жесткости;

5) передача движения объектам, т.е. передача крутящего момента или относительного движения заготовке (детали) в процессе ее обработки (сборки);

6) трансформация перемещения – изменение направления и скоростей движения тела;

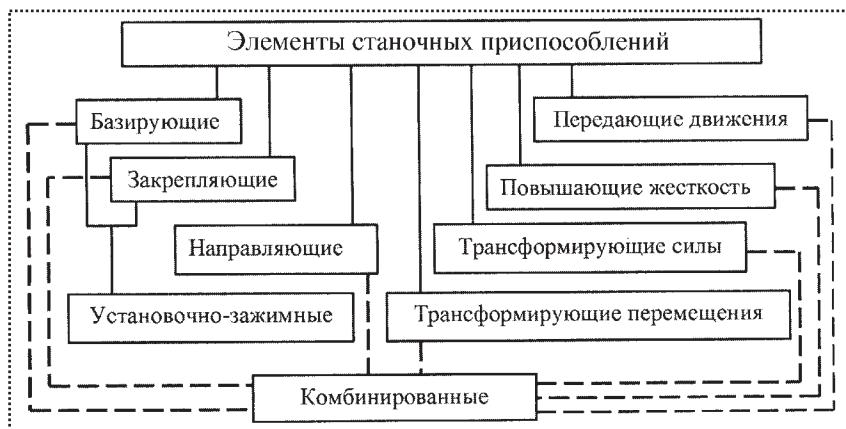
7) трансформация силы – изменение направления и значения внутренних и внешних сил, действующих на рассматриваемую систему.

На основе реализации функций станочными приспособлениями на рисунке представлена классификация элементов станочных приспособлений по функциональному назначению. Штриховыми линиями показаны реализации комбинированных приспособлений, которые могут выполнять различные функции, при этом не всегда всю их совокупность.

Для назначения оптимальных параметров качества на функциональные поверхности деталей приспособлений необходимо определить, для каких деталей приспособлений или приспособлений в целом, в зависимости от их функционального назначения, являются детерминированными те или иные их эксплуатационные свойства. Детерминированные эксплуатационные свойства, необходимые для функционирования приспособлений, представлены в табл. 1.

В основном приспособление состоит из взаимосвязанных деталей, для которых необходимо разрабатывать конструкторско-технологическую документацию с обоснованием тех или иных их параметров качества. Для каждой группы деталей приспособлений в табл. 2 представлены детерминированные эксплуатационные свойства.

Систематизация взаимосвязи проектных параметров качества функциональных поверхностей деталей приспособлений с приспособлениями определенного функционального назначения представлена в табл. 3. Взаимосвязь типов деталей при-



Классификация элементов станочных приспособлений по их функциональному назначению

способлений с лимитирующими их проектными параметрами качества представлена в табл. 4.

В табл. 3 и 4 приняты обозначения:
 ET_{np} – составляющие погрешности формы или расположения обрабатываемой поверхности заготовки, обусловленные неточностью изготовления приспособления и его деформациями;

Wz – высота волнистости по пяти точкам;

Wp, Rp – высота сглаживания профиля соответственно волнистости, шероховатости;

Sw – средний шаг неровностей волн;

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля;

Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам;

Таблица 1

Эксплуатационные свойства, определяющие надежность элементов станочных приспособлений

Порядковый номер	Эксплуатационные свойства	Базирующие	Закрепляющие	Направляющие	Передающие движение	Повышающие жесткость	Трансформирующие силы	Трансформирующие перемещения
1	Прочность	–	+*	+	+*	+*	+*	+
2	Контактная прочность	+	+	+	–	+*	–	+
3	Усталостная прочность	+	+*	+*	+*	+	–	–
4	Жесткость	+*	+*	–	–	+*	–	–
5	Контактная жесткость	+*	+*	–	–	+*	–	–
6	Износстойкость	+*	–	+*	–	+	–	+*
7	Коэффициент трения	+*	+*	+*	+*	–	–	+*
8	Виброустойчивость	+*	+*	+	+*	+	+	+
9	Зажимная способность	–	+*	–	+	–	–	–
10	Постоянство размеров	+*	+	+	–	–	–	–

Примечание. Здесь и далее в таблицах знак "+" обозначает существующую взаимосвязь между входными и выходными параметрами; знак "*" – определяет лимитирующие эксплуатационные свойства



Эксплуатационные свойства, определяющие надежность деталей приспособлений

Порядковый номер	Эксплуатационные свойства	Базовые	Корпусные	Установочные	Прижимные	Направляющие	Настроечные	Крепежные	Фиксирующие
1	Прочность	+*	+*	+	+*	+	+	+*	+*
2	Контактная прочность	+	+*	+*	+	+	-	-	+
3	Усталостная прочность	+	+*	+*	+*	+*	-	+	-
4	Жесткость	+*	+*	+*	+*	-	-	+	+
5	Контактная жесткость	+*	+*	+*	+*	-	-	+	+
6	Износстойкость	+	+	+*	+	+*	-	+	-
7	Коэффициент трения	+	-	+*	+*	+*	-	+*	+*
8	Виброустойчивость	+*	+*	+*	+*	+	-	+*	+*
9	Зажимная способность	-	-	-	+*	-	-	+*	-
10	Постоянство размеров	+*	+*	+*	+	-	+*	+	-

R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля;

tp – относительная опорная длина профиля;

Sm – средний шаг неровностей профиля;

S – средний шаг неровностей профиля по вершинам;

σ_b – предел прочности на разрыв;

σ_t – предел текучести материала;

E – модуль упругости первого рода;

μ – коэффициент Пуассона;

HB – твердость материала;

D_{kp} – размер кристаллита (зерна) материала;

ρ_d – плотность дислокационных петель материала;

σ_{ocst} – остаточные напряжения поверхностного слоя;

h_{σ_0} – глубина залегания остаточных напряжений;

H_{μ_0} – микротвердость поверхностного слоя;

h_n – глубина наклепанного слоя.

Разработаны качественные взаимосвязи проектных параметров качества приспособления с его параметрами точности при обеспечении эксплуатационных свойств приспособления на этапе его конструирования [1, 2] (знаки "↓" и "↑" означают, что для уменьшения выходного параметра необходимо соответственно уменьшить или увеличить значение входного параметра; цифры при стрелочках обозначают влияние эксплуатационного свойства в соответствии с его порядковым номером, представленным в табл. 1 и 2):

1) на погрешность базирования заготовки (ε_6) влияют параметры: $ET_{np}^* \downarrow_6, Wz \downarrow_6, Wp^* \downarrow_6, Sw \uparrow_6, Ra \downarrow_6, Rz \downarrow_6, Rmax \downarrow_6, Rp^* \downarrow_6, tp^* \uparrow_6, Sm^* \uparrow_6, S \uparrow_6, \sigma_b \uparrow_6, \sigma_t^* \uparrow_{6,10}, E \uparrow_{6,10}, \mu \uparrow_{6,10}, HB \uparrow_6, D_{kp}^* \uparrow_{10}, \rho_d \uparrow_{6,10}, \sigma_{ocst}^* \uparrow_{6,10}, H_{\mu_0}^* \uparrow_6$;

2) на погрешность закрепления заготовки (ε_3) влияют параметры: $ET_{np}^* \downarrow_{5,6} \uparrow_{7,9}, Wz^* \downarrow_{5,6} \uparrow_{7,9}$,



Таблица 3

Проектные параметры, определяющие надежность элементов станочных приспособлений

Проектные параметры	Типы приспособлений, ранжированных по функциональному назначению						
	базирующие	закрепляющие	направляющие	передающие движение	повышающие жесткость	трансформирующие силы	трансформирующие перемещения
$ET_{\text{пр}}$	+*	+*	+*	+	+*	+	+*
Wz	+	+	+	+	+	+	+
Wp	+*	+*	+*	+	+*	+	+*
Sw	+	+	+	+	+	+	+
Ra, Rz	+*	+*	+*	+	+*	+	+
R_{\max}	+	+	+	+	+	+	+
Rp	+*	+*	+*	+	+*	+	+*
tp	+*	+*	+*	+	+*	+	+*
Sm	+*	+*	+*	+	+*	+	+*
S	+	+	+	+	+	+	+
σ_B	+*	+*	+	+*	+*	+*	+*
σ_T	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+
E	+*	+*	+*	+	+*	+	+
μ	+*	+*	+*	+	+*	+	+
HB	+	+	+	+	+	+*	+
D_{kp}	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+
ρ_D	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+
σ_{oct}	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*
h_{σ_0}	+	+*	+	+*	+*	+*	+
H_{μ_0}	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*
h_H	+	+*	+	+*	+*	+*	+

$Wp^* \downarrow_{5,6} \uparrow_{7,9}, Sw^* \downarrow_{5,7,9} \uparrow_6, Ra^* \uparrow_{5,7,9} \downarrow_6, Rz^* \uparrow_{5,7,9} \downarrow_6,$
 $R_{\max}^* \uparrow_{5,7,9} \downarrow_6, Rp^* \uparrow_{5,7,9} \downarrow_6, tp^* \downarrow_{5,7,9} \uparrow_6,$
 $Sm^* \downarrow_{5,7,9} \uparrow_6, S^* \downarrow_{5,7,9} \uparrow_6, \sigma_B^* \downarrow_9 \uparrow_{6,7}, \sigma_T^* \uparrow_{5,6,7} \downarrow_9,$
 $E^* \uparrow_{4,5,6,7} \downarrow_9, \mu^* \uparrow_{4,5,6,7} \downarrow_9, HB^* \uparrow_{5,6,7} \downarrow_9, D_{\text{kp}}^* \uparrow_{4,5} \downarrow_9,$
 $\rho_D^* \uparrow_{4,5,6,7} \downarrow_9, \sigma_{\text{oct}}^* \uparrow_{5,6} \downarrow_{7,9}, h_{\sigma_0}^* \downarrow_9, H_{\mu_0}^* \uparrow_{5,6,7} \downarrow_9;$

3) на погрешность положения заготовки ($\varepsilon_u, \varepsilon_{yc}$) влияют параметры: $ET_{\text{пр}}^* \downarrow_{6,8} \uparrow_{7,9}, Wz^* \downarrow_{2,6,8} \uparrow_{7,9},$

$Wp^* \downarrow_{2,6,8} \uparrow_{7,9}, Sw \uparrow_{2,6} \downarrow_{7,8,9}, Ra^* \downarrow_{2,3,6} \uparrow_{7,8,9},$
 $Rz^* \downarrow_{2,3,6} \uparrow_{7,8,9}, R_{\max}^* \downarrow_{2,3,6} \uparrow_{7,8,9}, Rp^* \downarrow_{2,3,6} \uparrow_{7,8,9},$
 $tp^* \uparrow_{2,3,6} \downarrow_{7,8,9}, Sm^* \uparrow_{2,3,6} \downarrow_{7,8,9}, S \uparrow_{2,3,6} \downarrow_{7,8,9},$
 $\sigma_B^* \uparrow_{1,2,3,6,7} \downarrow_9, \sigma_T^* \uparrow_{1,2,3,6,7,10} \downarrow_{8,9}, E^* \uparrow_{1,2,3,6,7,8,10} \downarrow_9,$
 $\mu^* \uparrow_{1,2,3,6,7,8,10} \downarrow_9, HB^* \uparrow_{1,3,6,7,8} \downarrow_9, D_{\text{kp}}^* \downarrow_{1,9} \uparrow_{2,3,8,10},$
 $\rho_D^* \uparrow_{1,2,3,6,7,8,10} \downarrow_9, \sigma_{\text{oct}}^* \uparrow_{1,2,3,6} \downarrow_{7,9,10}, h_{\sigma_0}^* \uparrow_{1,2,3} \downarrow_9,$
 $H_{\mu_0}^* \uparrow_{1,2,3,6,7,8} \downarrow_9, h_H \uparrow_{1,2,3};$



Таблица 4

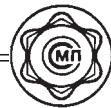
Проектные параметры, определяющие надежность деталей станочных приспособлений

Проектные параметры	Типы деталей приспособлений							
	базовые	корпусные	установочные и переходные	прижимные	направляющие	настроечные	крепежные	фиксирующие
$ET_{\text{пп}}$	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+	+
Wz	+	+	+	+	+	+*	+	+
Wp	+*	+*	+*	+*	+*	-	+	+
Sw	+	+	+	+	+	-	+	+
Ra, Rz	+*	+*	+*	+*	+	+*	+*	+*
R_{\max}	+	+	+	+	+	-	+	+
Rp	+*	+*	+*	+*	+*	-	+	+
tp	+*	+*	+*	+*	+*	-	+	+
Sm	+*	+	+*	+*	+*	-	+*	+*
S	+	+	+	+	+	-	+	+
σ_b	+*	+*	+*	+*	+*	+	+*	+*
σ_t	+*	+*	+*	+*	+	+*	+*	+*
E	+*	+*	+*	+*	+	+	+	+
μ	+*	+*	+*	+*	+	+	+	+
HB	-	+	+*	+	+	-	+	+
D_{kp}	+*	+*	+*	+*	+	+*	+*	+*
ρ_d	+*	+*	+*	+*	+	+*	+*	+*
σ_{oct}	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*
h_{σ_0}	+*	+*	+	+*	+	+	+*	+*
H_{μ_0}	+*	+*	+*	+*	+*	+	+*	+*
h_h	+*	+*	+*	+*	+	+	+*	+*

4) на погрешность положения заготовки ($\varepsilon_{\text{вбр}}$, $\varepsilon_{\text{вк}}$), обусловленную вибрационными перемещениями и колебаниями, влияют параметры: $ET_{\text{пп}}^* \downarrow_{5,7,8,9}$, $Wz^* \downarrow_{5,7,8,9}$, $Wp^* \downarrow_{5,7,8,9}$, $Sw^* \downarrow_{5,8} \uparrow_{7,9}$, $Ra^* \uparrow_{5,8} \downarrow_{7,9}$, $Rz \uparrow_{5,8} \downarrow_{7,9}$, $R_{\max} \uparrow_{5,8} \downarrow_{7,9}$, $Rp^* \uparrow_{5,8} \downarrow_{7,9}$, $tp^* \downarrow_{5,8} \uparrow_{7,9}$, $Sm^* \downarrow_{5,8} \uparrow_{7,9}$, $S \downarrow_{5,8} \uparrow_{7,9}$, $\sigma_b \downarrow_{7} \uparrow_{9}$, $\sigma_t \uparrow_{5,9,10} \downarrow_{7,8}$, $E^* \uparrow_{4,5,8,9,10} \downarrow_7$, $\mu^* \uparrow_{4,5,8,9,10} \downarrow_7$, $HB \uparrow_{5,8,9} \downarrow_7$, $D_{\text{kp}}^* \uparrow_{4,5,8,9,10}$, $\rho_d^* \uparrow_{4,5,8,9,10} \downarrow_7$, $\sigma_{\text{oct}}^* \uparrow_{5,7,9,10}$, $h_{\sigma_0}^* \uparrow_9$, $H_{\mu_0}^* \uparrow_{5,8,9} \downarrow_7$;

5) на погрешность формы обрабатываемых поверхностей заготовки влияют параметры: $ET_{\text{пп}}^* \downarrow_{5,6}$, $Wz \downarrow_{5,6}$, $Wp^* \downarrow_{5,6}$, $Sw \downarrow_5 \uparrow_6$, $Ra \uparrow_5 \downarrow_6$, $Rz \uparrow_5 \downarrow_6$, $R_{\max} \uparrow_5 \downarrow_6$, $Rp^* \uparrow_5 \downarrow_6$, $tp^* \downarrow_5 \uparrow_6$, $Sm^* \downarrow_5 \uparrow_6$, $S \downarrow_5 \uparrow_6$, $\sigma_b \uparrow_6$, $\sigma_t \uparrow_{5,6}$, $E \uparrow_{5,6}$, $\mu \uparrow_{5,6}$, $HB \uparrow_{5,6}$, $D_{\text{kp}} \uparrow_5$, $\rho_d \uparrow_{5,6}$, $\sigma_{\text{oct}}^* \uparrow_{5,6}$, $H_{\mu_0}^* \uparrow_{5,6}$;

6) на максимальные амплитуды колебаний базирующих поверхностей установочных опор



влияют параметры: $ET_{\text{пр}}^* \downarrow_{5,6,7,8,9}$, $Wz^* \downarrow_{5,6,7,8,9}$,
 $Wp^* \downarrow_{5,6,7,8,9}$, $Sw \downarrow_{5,8} \uparrow_{6,7,9}$, $Ra^* \uparrow_{5,8} \downarrow_{6,7,9}$,
 $Rz^* \uparrow_{5,8} \downarrow_{6,7,9}$, $Rmax \uparrow_{5,8} \downarrow_{6,7,9}$, $Rp^* \uparrow_{5,8} \downarrow_{6,7,9}$,
 $tp^* \downarrow_{5,8} \uparrow_{6,7,9}$, $Sm^* \downarrow_{5,8} \uparrow_{6,7,9}$, $S \downarrow_{5,8} \uparrow_{6,7,9}$, $\sigma_b^* \downarrow_7 \uparrow_{6,9}$,
 $\sigma_t^* \uparrow_{5,6,9} \downarrow_{7,8}$, $E^* \uparrow_{5,6,8,9} \downarrow_7$, $\mu^* \uparrow_{5,6,8,9} \downarrow_7$,
 $HB \uparrow_{5,6,8,9} \downarrow_7$, $D_{kp}^* \uparrow_{5,8,9}$, $\rho_d^* \uparrow_{5,6,8,9} \downarrow_7$, $\sigma_{\text{ост}}^* \uparrow_{5,6,7,9}$,
 $h_{\sigma_0}^* \uparrow_9$, $H_{\mu_0}^* \uparrow_{5,6,8,9} \downarrow_7$.

Анализируя градиент влияния проектных параметров качества приспособления на составляющие показатели его точности, можно заключить, что выбор или расчет проектных параметров качества носят многокритериальный характер (относительно эксплуатационных свойств), и обязывает конструктора технологической оснастки решать оптимизационные задачи по определению оптимальных или рациональных параметров качества приспособления.

Обобщенная структура методологии определения проектных параметров качества и эксплуатационных свойств станочных приспособлений следующая:

1) определяют математические зависимости, показывающие взаимосвязи проектных параметров качества деталей приспособлений и их эксплуатационных свойств с погрешностью установ-

ки заготовки в приспособлении, параметрами макроотклонения, волнистости и шероховатости обрабатываемых поверхностей заготовки, параметрами качества обрабатываемых поверхностей заготовки при использовании поводковых приспособлений;

2) на основе совокупности математических зависимостей, определенных п. 1, решают обратную задачу по определению проектных параметров качества деталей приспособления при заданных значениях параметров качества обрабатываемых поверхностей заготовок;

3) для рассчитанных проектных параметров качества деталей приспособлений назначают методы и режимы обработки резанием.

Эффективность решения поставленной проблемы определяется экономическим эффектом от внедрения новых решений в области конструирования станочных приспособлений.

Библиографический список

- Машиностроение.** Энциклопедия. Т. III–3. Технология изготовления деталей машин / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2000. 839 с.
- Машиностроение.** Энциклопедия. Т. IV–3. Надежность машин / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.), В.В. Клюев, А.П. Гусенков, К.С. Колесников. М.: Машиностроение, 1998. 592 с.




ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ
 учебное пособие
 А.А. Гусев, И.А. Гусева
 2013 г. Объем 416 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-722-9 Цена 700 р.

 Изложены теория и практика конструирования современных прогрессивных приспособлений для механосборочных производств. Подробно представлен метод автоматизированного проектирования приспособлений и рационального их конструирования. Показаны точностные и силовые расчеты.
 Даны зависимости для проведения экономических расчетов при применении различных видов приспособлений.
 Во 2-м издании (1-е вышло в 2007 г.) представлены зарекомендовавшие себя на практике методы проектирования и средства автоматизации для мелкосерийных производств, показана высокономичная система технологической оснастки для автоматической серийной многономенклатурной сборки изделий.
 Для студентов и аспирантов технических вузов. Может быть полезно инженерно-техническим работникам машиностроительных предприятий.

 Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
 по почте: 107076, г. Москва, Строгинский 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. 621.866:629.5.024

А.Я. Розинов, д-р техн. наук (ОАО "Центр технологии судостроения и судоремонта", г. С-Петербург), **А.В. Догадин**, канд. техн. наук (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет),
А.Ю. Бескровный (ОАО "Корпорация оборонной технологии", г. С-Петербург)
E-mail: mail@kompensator.ru

Сборка соединений обшивки корпусов судов с применением специализированных сборочных устройств

Представлены технические характеристики существующего ручного сборочного инструмента и средств малой механизации, указаны технические и технологические недостатки применяемых средств сборки соединений обшивки, определены основные направления совершенствования средств сборки. Также представлены технологические требования к конструкции специализированных сборочных устройств, описан состав элементов специализированных сборочных устройств и особенности технологии применения этих устройств, приведены схемы установки и закрепления сборочных и подкрепляющих устройств из однотипных унифицированных элементов, перечислены преимущества и указан технико-экономический эффект применения специализированных средств сборки соединений обшивки.

Technical characteristics of the existing manual assembly tool and means of small-scale mechanization are presented, technical and technological shortcomings of applied means of assembly of connections of a covering are specified. The main directions of improvement of means of assembly are defined, production requirements to a design of specialized assemblers are presented, the structure of elements of specialized assemblers and feature of technology of use of these devices is described, schemes of installation and fixing of assembly and supporting devices from the same unified elements are provided, advantages are listed and the size of technical and economic effect of application of specialized means of assembly of connections of a covering is specified.

Ключевые слова: техническая характеристика, средство сборки, соединение обшивки, составная часть сборочного устройства, полуавтоматическая сварка, сварочный пистолет, выполнение сборки, технологическое преимущество, технология сборки, электроприварка, плотность наплавленного металла, расход электродов, расход ацетилена и кислорода, трудозатраты, стоимость трудозатрат, стоимость материалов, стоимость энергорасходов и капиталовложений, технико-экономический показатель, технико-экономический эффект.

Keywords: technical characteristic, means of assembly, covering connection, component of assembler, semi-automatic welding, welding gun, assembly performance, technological advantage, technology of assembly, electrowelding, density of the built-up metal, expense of electrodes, consumption of acetylene and oxygen, labor cost, cost of labor costs, cost of materials, cost of power expenses and capital investments, technical and economic indicator, technical and economic effect.

Согласно данным опыта работы отечественных предприятий, для выполнения сборки соединений обшивки строящихся или ремонтируемых корпусов

судов традиционно применяют ручной сборочный инструмент, технические характеристики которого представлены в табл. 1.

Указанный в табл. 1 сборочный инструмент типа сборочного клина, "рыбьего хвоста" и сборочных струбцин мобилен, так как имеет, в основном, размеры и массу, весьма приемлемые для выполнения соединений обшивки в условиях постройки или ремонта корпусов судов. Однако использование этого инструмента связано с необходимостью затрат тяжелого ручного труда на забивание сборочных клиньев кувалдой и вращение вручную на jakiных винтов. Это обстоятельство во многом послужило причиной разработки и использования средств малой механизации, включающих прижины с ручным гидравлическим насосом, пневмогидравлические домкраты и домкраты ударно-вращательного действия, технические характеристики которых приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что гидравлические прижины и пневмогидравлические домкраты, а также домкраты ударно-вращательного действия способны создавать существенно большие усилия, чем средства сборки типа сборочных клиньев и винтовых струбцин. Однако их габариты и масса превышают габариты и массу сборочных клиньев и винтовых струбцин. Последнее объясняется тем, что средства сборки, представленные в табл. 2, проектировали с расчетом универсальности их использования для сборки соединений судовой обшивки, а также балок подкрепляющего набора.

Применительно к условиям сборки соединений обшивки, гидравлические прижины используют в качестве силовых элементов, встраиваемых либо в приспособления типа винтовой скобы, либо во временно привариваемые струбцины, что сущест-

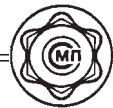


Таблица 1

Технические характеристики ручного сборочного инструмента

Сборочный инструмент	Размеры, мм		Масса	Наибольшее усилие, кН
	Длина	Высота		
Клин сборочный	150	28	1,7	До 75
	250	35	5,2	
Приспособление типа "рыбий хвост" с одним нажимным винтом	275	210	5,5	До 10
	500	275	11,7	
Приспособление типа винтовой скобы для обжатия и правки	500	330	23,1	До 20
	600	330	24,6	
Струбцина сборочная с одним нажимным винтом	124	86	0,50	До 2,5
	185	130	0,56	
	230	170	2,94	
	320	230	6,47	

венно увеличивает массу, габариты и стоимость таких сборочных устройств по сравнению с показателями стоимости сборочного инструмента, представленного в табл. 1.

В процессе сборки пневмогидравлические и ударно-вращательные домкраты используют совместно с временно привариваемыми Г-образными скобами. Из-за того, что силовую часть домкрата располагают под такими скобами, размеры и масса последней возрастают в 2–3 раза.

На основе выполненного анализа протяженности соединений обшивки ряда строящихся или ре-

монтируемых судов различного эксплуатационного назначения построена табл. 3. Данные этой таблицы свидетельствуют о том, какое важное значение для средств выполнения сборки соединений обшивки имеют их масса, габариты и удобство применения.

В связи с тем, что масса и габариты инструмента, указанного в табл. 1, являются меньшими, несмотря на наличие существующих разработок средств малой механизации различного действия, до сего времени для сборки соединений обшивки преимущественно используют сборочные клинья и

Таблица 2

Технические характеристики средств малой механизации

Техническая характеристика	Прижимы с ручным гидравлическим насосом		Пневмогидравлические домкраты		Домкраты ударно-вращательного действия	
			ДПГ-10	ДПГ-20	ДПУ-10	ДПУ-20
Нажимное усилие, кН	50	100	100	200	100	200
Наибольший ход силового плунжера, мм	30	35	60	100	60	80
Масса, кг	3,5	5,0	7,5	14,0	6,8	12,0
Габаритные размеры, мм	450×140	470×140	430×135×64	450×200×90	355×100×155	390×125×200

Таблица 3

Результаты анализа протяженности соединений обшивки

Отличительный признак соединения обшивки	Вид соединения обшивки	Соотношение протяженности соединений обшивки, %
Расположение в пространстве	В нижнем положении	31...47
	На вертикальной плоскости	19...42
	В потолочном положении	17...34
Степень доступности	Неограниченные для доступа	77...86
	Частично ограниченные для доступа	8...18
	Труднодоступные	2...10
Форма соединяемых монтажных кромок	По прямой линии	58...73
	По линии с кривизной одного знака	24...40
	По линии с двойкой кривизной	2...4

временно привариваемые струбцины с нажимным винтом.

С целью уменьшения влияния указанного недостатка совершенствование средств выполнения сборки соединений обшивки следует осуществлять по трем основным направлениям, включающим:

- специализацию сборочных устройств главным образом на операциях сведения кромок соединяемой обшивки;
- минимизацию массы и габаритов составных частей сборочных устройств, при обязательном обеспечении механизации операций сведения монтажных кромок обшивки и механизации операций крепления сборочных устройств к поверхности соединяемой обшивки;
- модернизацию креплений сборочных устройств к поверхности обшивки, обеспечивающую существенное сокращение объема временной приварки элементов крепления.

Практическим примером реализации указанного может служить специализированное сборочное устройство, состоящее из унифицированных частей различного эксплуатационного назначения.

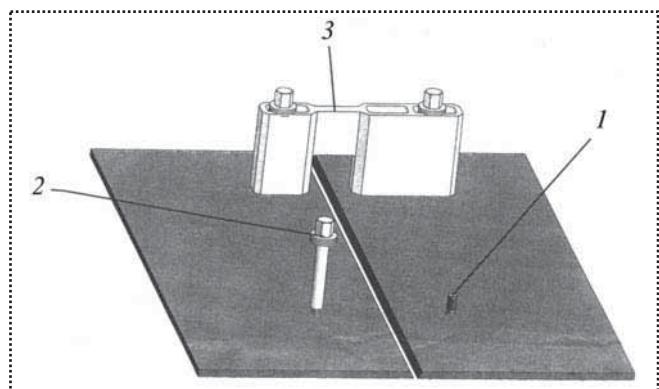


Рис. 1. Специализированное сборочное устройство для выполнения соединений обшивки:

1 – временно привариваемая шпилька; 2 – фиксирующий или нажимной болт; 3 – соединительный мостик

Общий вид и унифицированные составляющие специализированного сборочного устройства представлены на рис. 1.

Конструктивно-технологическое отличие специализированного сборочного устройства, представленного на рис. 1, от применяемых в настоящее время средств сборки заключается в способе его крепления к поверхности обшивки, существенно уменьшающем объем и трудоемкость временной сварки. Достигается это тем, что вблизи соединяемых кромок обшивки и по обе стороны выполняемого соединения обшивки временно приваривают крепежные нарезные шпильки. Такие шпильки значительно меньше по размерам и площади крепления, нежели традиционно используемые приварные крепежные скобы. Кроме того, крепление указанных шпилек выполняют сварочным пистолетом (рис. 2).

После приварки крепежных шпилек на них устанавливают соединительные мостики, которые первоначально закрепляют на поверхности одной из соединяемых частей обшивки при помощи фиксирующих болтов с шестигранными головками (рис. 3).

Для установки соединительных мостиков выбирают одну из двух стыкуемых частей обшивки, поверхность которой из-за волнобразного несовпадения стыкуемых кромок располагается выше поверхности соединяемой смежной части обшивки. После фиксации соединительных мостиков вблизи одной из стыкуемых кромок обшивки эти мостики скрепляют с другой кромкой обшивки путем установки на временно приваренной шпильке нажим-

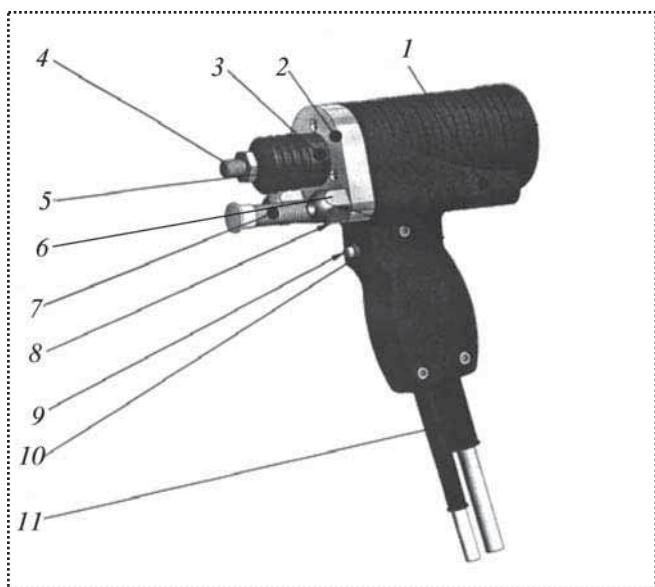


Рис. 2. Сварочный пистолет для выполнения временной приварки крепежных нарезных шпилек:

1 – корпус пистолета; 2 – монтажная плата корпуса; 3 – корпус поршня; 4 – держатель для временного закрепления шпилек; 5 – сильфонный кожух; 6 – головка зажимного винта; 7 – амортизатор; 8 – внутренний винт с шестигранной зажимной головкой; 9 – основание электрического выключателя; 10 – пусковая кнопка электрического выключателя; 11 – энергопитающие электрические присоединительные кабели

ного болта с шестигранной головкой. Вращением этого болта с навинчиванием на ранее приваренную крепежную нарезную шпильку обеспечивают сведение стыкуемых кромок обшивки в единую плоскость. После этого соединенные кромки обшивки скрепляют электроприхватками и затем приваривают друг к другу.

Удаление специализированного сборочного устройства осуществляют поэлементно. По мере выполнения сварки стыкуемых кромок обшивки

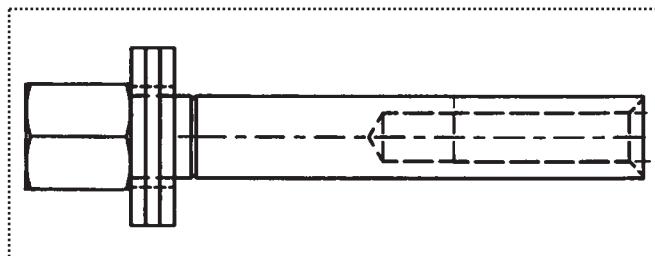


Рис. 3. Фиксирующий или нажимной болт с подкладными шайбами и внутренним каналом с резьбой для навинчивания на временно приваренные нарезные шпильки

временно приваренные крепежные нарезные шпильки срезают шлифовальной машинкой.

Для исключения деформаций свариваемых стыков обшивки устанавливают временные подкрепления, выполненные из унифицированных мостиков различной длины (рис. 4).

Приведенные на рис. 4 подкрепляющие устройства фиксируют на поверхности обшивки с помощью временно привариваемых крепежных нарезных шпилек и навинченных на эти шпильки болтов с шестигранной головкой.

Выполненными исследованиями установлено, что сборка соединений обшивки, осуществленная с применением специализированных устройств, примером которых может быть средство сборки, составляемое на месте выполнения работ из унифицированных элементов, способно обеспечить ряд технологических преимуществ:

- существенное облегчение доставки средств сборки к месту производственного применения и повышение эффективности их установки, а также применение для сборки соединений обшивки, расположенных в различных пространственных положениях, в труднодоступных местах;
- исключение необходимости традиционного изготовления на рабочем месте временно привариваемых Г-образных скоб и рыбин для подкрепления стыка обшивки, что сокращает трудозатраты сборки и расход ацетилена и кислорода, а также необходимость применения газорежущего оборудования;
- механизация приварки унифицированных и предварительно изготовленных крепежных нарезных шпилек, заменяющих традиционно привариваемые Г-образные скобы и планки, путем применения сварочных пистолетов, что сокращает объем наплавленного металла, уменьшает опасность прожогов и деформаций обшивки, а также сокращает трудозатраты по удалению временно приварива-

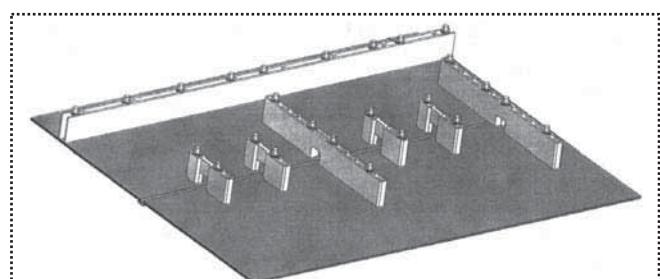


Рис. 4. Схема установки сборочных и подкрепляющих устройств из унифицированных элементов



мых элементов крепления и зачистки поверхности обшивки в местах установки этих креплений;

- применение унифицированных соединительных мостиков, используемых в качестве средств сборки и позволяющих создавать на их основе не только разнообразную гамму средств сборки, но также гамму разнотипных временных подкреплений для предотвращения местных деформаций соединяемых кромок обшивки при их сварке.

Анализ существующей практики выполнения сборки соединений обшивки свидетельствует о том, что с целью сведения и выравнивания монтажных кромок в единую плоскость сейчас используют временно привариваемые элементы крепления (скобы, планки и др.), масса которых изменяется в пределах от 0,75 до 2,30 кг. При этом для осуществления временной фиксации различных по конструкции элементов крепления ставят в среднем от 3 до 10 электроприхваток, средняя протяженность которых составляет 0,05 м.

В результате для сборки одного погонного метра соединения обшивки по традиционной технологии необходим металл, масса которого может доходить до $m_i = 2,3$ кг. При этом с целью временного крепления элементов различной конструкции требуется установка до 10 электроприхваток, общая протяженность которых составляет $l_i = 10 \cdot 0,05 = 0,5$ м.

На выполнение указанных электроприхваток катетом 0,05 м используют электроды, расход которых определяется выражением

$$\Sigma q = l_i f_i \gamma K_i = 2,3 \cdot 0,15 \cdot 7,8 \cdot 1,7 \cdot 10^{-1} = 0,46 \text{ кг},$$

где f_i — площадь поперечного сечения электроприхваток, м^2 ;

γ — плотность наплавленного металла электроприхваток, $\text{кг}/\text{м}^3$;

K_i — коэффициент расхода электродов, равный 1,7.

Расход электроэнергии при ручной сварке составляет 10 кВт·ч. С учетом этого при установке электроприхваток расход электроэнергии

$$\Sigma w_i = 10,5 \cdot 0,46 = 4,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

В процессе выполнения сборки соединений обшивки временно привариваемые элементы крепления средств сборки изготавливают на месте проведения сборочных работ, вырезая их из остатков материала обшивки вручную кислородно-акетиленовыми резаками. Если учесть, что в среднем протя-

женность вырезаемых крепежных элементов равна 0,2 м, тогда расход составит:

- кислорода (при расходе на 1 м $0,292 \text{ м}^3$)

$$\Sigma k_i = 0,2 \cdot 0,292 = 0,06 \text{ м}^3;$$

- ацетилена (при расходе на 1 м $0,045 \text{ м}^3$)

$$\Sigma a_i = 0,2 \cdot 0,045 = 0,009 \text{ м}^3.$$

После завершения сборки на месте установки временно привариваемых элементов крепления осуществляют зачистку поверхности обшивки, для чего применяют пневматические машинки.

При выполнении сборки соединений обшивки на протяжении одного погонного метра соединяемых кромок с целью временного крепления элементов фиксации средств сборки устанавливают от 4 до 14 электроприхваток. С учетом этого на зачистку среднего числа электроприхваток, составляющего 10 единиц, в течение 3 мин расходуют сжатый воздух в объеме

$$\Sigma b_i = 1,8 \cdot 3 \cdot 10 = 54 \text{ м}^3.$$

Суммарные трудозатраты на выполнение одного погонного метра монтажного соединения обшивки составляют в среднем 3,26 нормо-ч.

Экспериментальное использование специализированных сварочных пистолетов для осуществления приварки шпилек показывает, что в этом случае обеспечивается возможность трехкратного сокращения трудозатрат по сравнению с традиционной установкой и временной приваркой Г-образных скоб.

Применение пневматических гайковертов для вращения винтов сборочного устройства с целью сведения и выравнивания кромок обшивки в единую плоскость позволяет ускорить этот процесс практически в 1,6 раза. При этом суммарный расход сжатого воздуха, используемого для привода в действие одного пневматического гайковерта составит $0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$. Наряду с этим для зачистки остатков сварных швов может быть использована пневматическая машинка, требующая расхода сжатого воздуха $1,8 \text{ м}^3/\text{мин}$.

С учетом применения сварочных пистолетов, пневматических гайковертов и зачистных машинок, трудоемкость выполнения монтажных соединений составит 1,6 нормо-ч.

По сравнению с традиционным закреплением временно привариваемых Г-образных скоб мето-



дом дуговой ручной сварки с использованием электродов, приварка крепежных шпилек может быть осуществлена при помощи пистолетов с расходом энергии 100 кВт·ч.

Приведенные данные позволяют рассчитать экономический эффект, характеризующий практическое использование специализированных сборочных устройств:

$$\mathcal{E} = (C_1 - C_2) - 0,15 (K_2 - K_1), \text{ руб.},$$

где C_1 – стоимость трудозатрат, материалов и ресурсов при выполнении сборки соединений обшивки с применением традиционных средств, руб.;

C_2 – стоимость трудозатрат, материалов и ресурсов при выполнении сборки соединений обшивки с применением специализированных средств, руб.;

K_1 – стоимость капиталовложений для осуществления сборки соединений обшивки с применением традиционных средств, руб.;

K_2 – стоимость капиталовложений для осуществления сборки соединений обшивки с применением специализированных средств, руб.;

0,15 – коэффициент использования капиталовложений, необходимых для осуществления сборки соединений обшивки с применением традиционных и специализированных средств ее выполнения.

При проведении расчета экономического эффекта в состав значения показателя C_1 включены:

- оплата общих трудозатрат – 3,26 нормо-ч;
- стоимость 0,46 кг электродов и 1,5 кг временно привариваемых Г-образных скоб;
- стоимость 4,83 кВт·ч электроэнергии, 0,06 м³ кислорода, 0,009 м³ ацетилена и 1,8 м³ сжатого воздуха.

В состав значения показателя C_2 включены:

- оплата общих трудозатрат – 1,6 нормо-ч;
- стоимость 0,7 кВт·ч электроэнергии и 0,7 м³ сжатого воздуха. С учетом стоимости одного нормо-ч – 200 руб., одного килограмма электродов – 90 руб., 1 кг металла – 20 руб., 1 кВт·ч электроэнергии – 4 руб., 1 м³ кислорода – 3750 руб., 1 м³ ацетилена – 20000 руб. и 1 м³ сжатого воздуха – 0,8 руб., значение показателя

$$\begin{aligned} C_1 &= 3,26 \cdot 200 + 0,46 \cdot 90 + 1,5 \cdot 20 + \\ &+ 4,83 \cdot 4 + 0,06 \cdot 3750 + 0,009 \cdot 20000 + \\ &+ 1,8 \cdot 0,8 = 1149,2 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Значение показателя $C_2 = 1,6 \cdot 200 + 100 \cdot 4 + 2,5 \cdot 0,8 = 722$ руб.

Согласно конструктивным особенностям, одним из главных преимуществ специализированных устройств сборки является их монтаж на месте выполнения работ из унифицированных, заранее изготовленных и централизованно поставляемых соединительных мостиков болтов с шестигранными головками, временно привариваемых шпилек с нарезным стержнем. Указанное преимущество специализированных сборочных устройств позволяет исключить традиционное изготовление временно привариваемых Г-образных скоб из листов стали на месте выполнения сборки путем ручной кислородно-ацетиленовой резки.

Соответственно установившейся практике отечественного судостроения и судоремонта при выполнении соединений обшивки используют Г-образные скобы, масса которых доходит до 1,5 кг. Наряду с этим для подкрепления соединенных кромок наружной обшивки перед сваркой применяют ребра жесткости, масса которых в среднем составляет 6 кг.

При использовании специализированных сборочных устройств применяют соединительные мостики, также ребра жесткости из соединительных мостиков. Максимальная масса соединительных мостиков может быть 1,3 кг, а ребер жесткости – доходить до 2,6 кг.

Традиционно на 1 погонный метр соединений обшивки располагают три Г-образные скобы, а также одно ребро жесткости. По аналогии из такого же числа соединительных мостиков и конструктивно схожих с ними ребер жесткости должны состоять специализированные сборочные устройства.

В результате применения традиционных Г-образных скоб и ребер жесткости расходы металла на 1 погонный метр соединений составляют: $3 \cdot 1,5 + 6 = 10,5$ кг, а при использовании специализированных сборочных устройств эти расходы составят максимально $3 \cdot 1,3 + 2,6 = 6,5$ кг. В результате получим снижение металлоемкости используемых средств сборки в $10,5 : 6,5 = 1,6$ раза.

С учетом приведенных данных в качестве объектов расчета экономической эффективности приняты:

- среднее судно с общей протяженностью соединений обшивки 552 м;



- малое судно с общей протяженностью соединений обшивки 164 м.

Соответственно указанному для расчета экономического эффекта приняты следующие значения показателей:

C_1 и C_2 , умноженные на 552, – для среднего судна;

C_1 и C_2 , умноженные на 164, – для малого судна.

В результате будем иметь для расчета технико-экономических показателей применения специализированных средств сборки соединений наружной обшивки в условиях постройки:

- среднего судна:

$$C_1 = 1149,2 \cdot 552 = 634\,358 \text{ руб.};$$

$$C_2 = 722 \cdot 552 = 398\,544 \text{ руб.};$$

- малого судна:

$$C_1 = 1149,2 \cdot 164 = 188\,469 \text{ руб.};$$

$$C_2 = 722 \cdot 164 = 118\,408 \text{ руб.}$$

Применительно к постройке указанных судов стоимость капиталовложений определена с учетом стоимости оборудования и стандартизированной оснастки, используемых для реализации традиционной технологии соединений обшивки и технологии сборки обшивки с применением специализированных сборочных устройств.

Согласно этому во всех случаях стоимость капиталовложений K_1 определена стоимостью используемых ручных кислородно-ацетиленовых резаков, средств ручной сварки и источников питания сварочным током, а также стоимостью применяемых ручных пневматических машинок.

Соответственно, стоимость капиталовложений K_2 определена стоимостью используемых сварочных пистолетов и генераторов сварочного тока для этих пистолетов, стоимостью используемых пневматических гайковертов и зачистных машинок, а также стоимостью многократно используемых универсальных сборочных устройств. При этом стоимость одной пневматической зачистной машинки принята равной 6000 руб., стоимость одного пневматического гайковерта – 15 000 руб., стоимость средств ручной сварки и питания сварочным током от многопостового источника – 93 600 руб. и однопостового источника – 30 000 руб., стоимость

ручного кислородно-ацетиленового резака – 1200 руб., стоимость пистолета для временной приварки крепежных шпилек – 60 000 руб. и генератора сварочного тока – 300 000 руб. Стоимость комплекта специализированных сборочных устройств, включающего набор переходных мостиков, болтов и шпилек – 640 руб.

В результате для расчета технико-экономических показателей, характеризующих применение специализированных средств сборки соединений наружной обшивки в условиях постройки:

- среднего судна:

$$K_1 = 2 \cdot 1200 + 1 \cdot 93\,600 + 2 \cdot 6000 = 108\,000 \text{ руб.};$$

$$K_2 = 2 \cdot 60\,000 + 2 \cdot 300\,000 + 80 \cdot 640 + 2 \cdot 15\,000 + 2 \cdot 6000 = 813\,200 \text{ руб.};$$

- малого судна:

$$K_1 = 2 \cdot 1200 + 2 \cdot 30\,000 + 2 \cdot 6000 = 96\,000 \text{ руб.};$$

$$K_2 = 2 \cdot 60\,000 + 1 \cdot 300\,000 + 30 \cdot 640 + 2 \cdot 15\,000 + 2 \cdot 6000 = 481\,200 \text{ руб.}$$

Соответственно указанному ранее экономический эффект составит при постройке:

- среднего судна:

$$\mathcal{E}_k = (634\,358 - 398\,544) - 0,15(813\,200 - 108\,000) = 130\,034 \text{ руб.};$$

- малого судна:

$$\mathcal{E}_c = (188\,469 - 118\,408) - 0,15(481\,200 - 96\,000) = 12\,281 \text{ руб.}$$

Библиографический список

1. Адлерштейн Л.Ц., Орлов М.В., Розинов А.Я., Соколов В.Ф. Механизация сборочных работ на стапеле. Л.: Судостроение, 1970. 307 с.

2. Адлерштейн Л.Ц., Розинов А.Я., Соколов В.Ф., Шрамерман М.Р. Постройка корпусов судов на стапеле. Л.: Судостроение, 1977. 304 с.

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 621.039.533

Ю.В. Вытнов, А.Г. Александрин, С.В. Голубев, Е.А. Герасимов,
Н.П. Медведев, канд. техн. наук (ОАО "ОКБМ Африкантов", г. Нижний Новгород)
E-mail: golubevsv@okbm.nnov.ru

Опыт применения электронно-лучевой сварки при изготовлении теплообменного оборудования в ОАО "ОКБМ Африкантов"

Рассмотрен процесс изготовления теплообменного оборудования для ядерных энергетических установок с применением электронно-лучевой сварки.

The process of manufacture of heat-exchange equipment for nuclear power plants with the use of electron-beam welding was described.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, теплообменное оборудование, электронный луч.

Keywords: electron-beam welding, heat-exchange equipment, electron beam.

В настоящее время ОАО "ОКБМ Африкантов" занимается изготовлением оборудования для реакторной установки нового поколения РИТМ-200 новых двухосадочных ледоколов ЛК-60Я.

При изготовлении изделий применяют ряд новых технологических решений, связанных как с механической обработкой, так и со сборкой и сваркой.

Одним из наиболее ответственных элементов реакторной установки является теплообменное оборудование, к технологии изготовления которого предъявляют особые требования.

Разработка и создание теплообменного оборудования с плоскими теплообменными модулями потребовала применения прогрессивных способов сварки.

Опыт промышленного применения в нашей стране и за рубежом электронно-лучевой сварки (ЭЛС) свидетельствует о том, что в ряде случаев она имеет неоспоримое преимущество перед электродуговыми технологиями получения неразъемных соединений [1].

Производится ЭЛС в вакууме, поэтому позволяет сохранить исходную чистоту свариваемых дета-

лей и получать сварные соединения высокого качества [2].

Для сварки теплообменного оборудования в ОАО "ОКБМ Африкантов" применяется установка ЭЛС УЛ-178М (рис. 1), изготовленная институтом электросварки им. Е.О. Патона (г. Киев). Установка оснащена стационарной электронно-лучевой пушкой, расположенной снаружи вакуумной камеры.

Процесс ЭЛС теплообменного оборудования может быть выполнен двумя способами:

- с помощью отклоняющей системы электронного луча при неподвижных изделии и электронно-лучевой пушки;

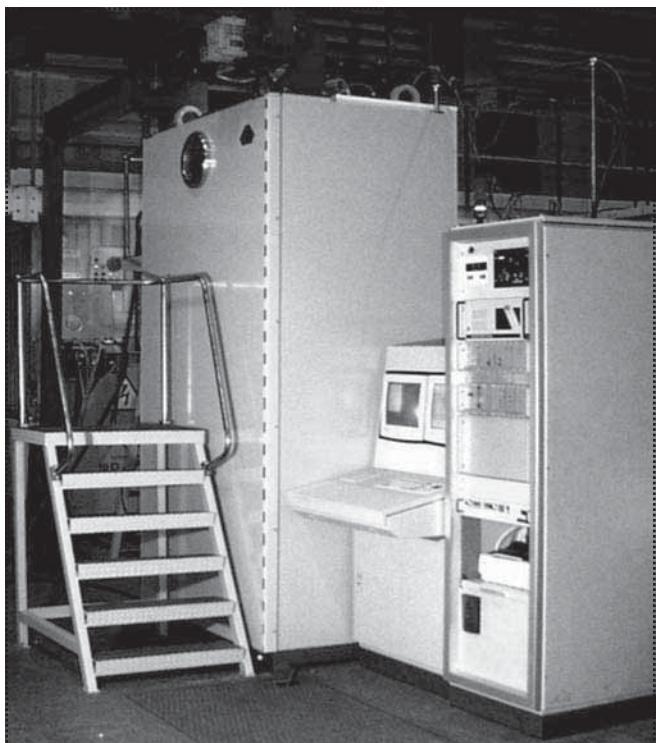


Рис. 1. Установка ЭЛС УЛ-178М

• путем вращения рабочего стола, с закрепленным в нем изделием, при неподвижной электронно-лучевой пушке.

Первый способ применяют для сварки труб теплообменных элементов диаметром до 8 мм с трубными досками (рис. 2).

Второй способ применяется при сварке цилиндрических деталей диаметром более 20 мм.

Электронный пучок, сформированный в электронной пушке 1, фокусируется электромагнитной линзой 2 на поверхность свариваемого изделия.

Отклонение и перемещение сфокусированного электронного луча по свариваемому стыку теплообменного элемента 6 и трубной доски 7 производится с помощью отклоняющей системы 3.

После перемещения рабочего стола по управляющей программе таким образом, чтобы ось очередного свариваемого теплообменного элемента совпала с осью электронно-лучевой пушки, осуществляется точное совмещение электронного луча по кольцевому стыку с помощью автоматизированной системы управления 5, на вход которой с коллектора 4 поступают вторично-эмиссионные сигналы от кромок свариваемых деталей.

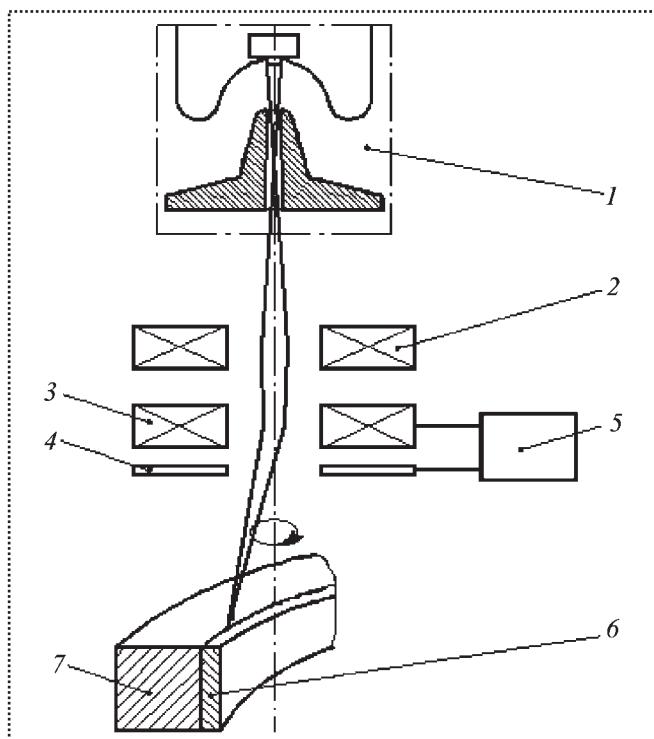


Рис. 2. Электронно-лучевая сварка труб теплообменных элементов диаметром до 8 мм с трубными досками

Сварка цилиндрических деталей диаметром 20 и 27 мм с помощью отклоняющей системы электронного луча не представляется возможной. В данном случае сварку осуществляют путем вращения рабочего стола, с закрепленным на нем изделием, с помощью специального механизма перемещения (рис. 3).

Механизм перемещения рабочего стола состоит из сварной рамы, на которой смонтированы четыре линейных модуля фирмы Rexroth (по два на каждую координату), в которых прецизионная шарико-винтовая пара преобразовывает вращательное движение в поступательное. Вращение по каждой координате передается электродвигателем, посредством зубчатой ременной передачи. Для точного позиционирования механизма перемещения изделия оба электродвигателя снабжены датчиками угла поворота.

Линейные модули (шарико-винтовые пары), приводящие рабочий стол в движение, получают сигналы от датчиков угла поворота в угловых координатах, которые через компьютер за счет корректировки через коэффициенты перемещения переводятся в линейные координаты X и Y и двигают рабочий стол по окружности, т.е. имеет место круговая интерполяция — перевод угловых координат в линейные.

Для ЭЛС модулей теплообменного оборудования РИТМ-200 была изготовлена специальная оснастка. На плите рабочего стола размещены датчики диагностики, контрольные пластины проплавления, образцы-свидетели.

Фотографии образца-имитатора и фрагмента модуля теплообменного оборудования после сварки приведены на рис. 4 и 5.

Установка ЭЛС УЛ-178М позволяет выполнять сварку соединений теплообменного оборудования с помощью отклоняющей системы электронного луча (при неподвижном изделии) для сварных соединений диаметром 8 мм и статическим лучом без круговой развертки для сварных соединений диаметрами 20 и 27 мм путем одновременного плавного перемещения приводов рабочего стола по координатам X и Y .

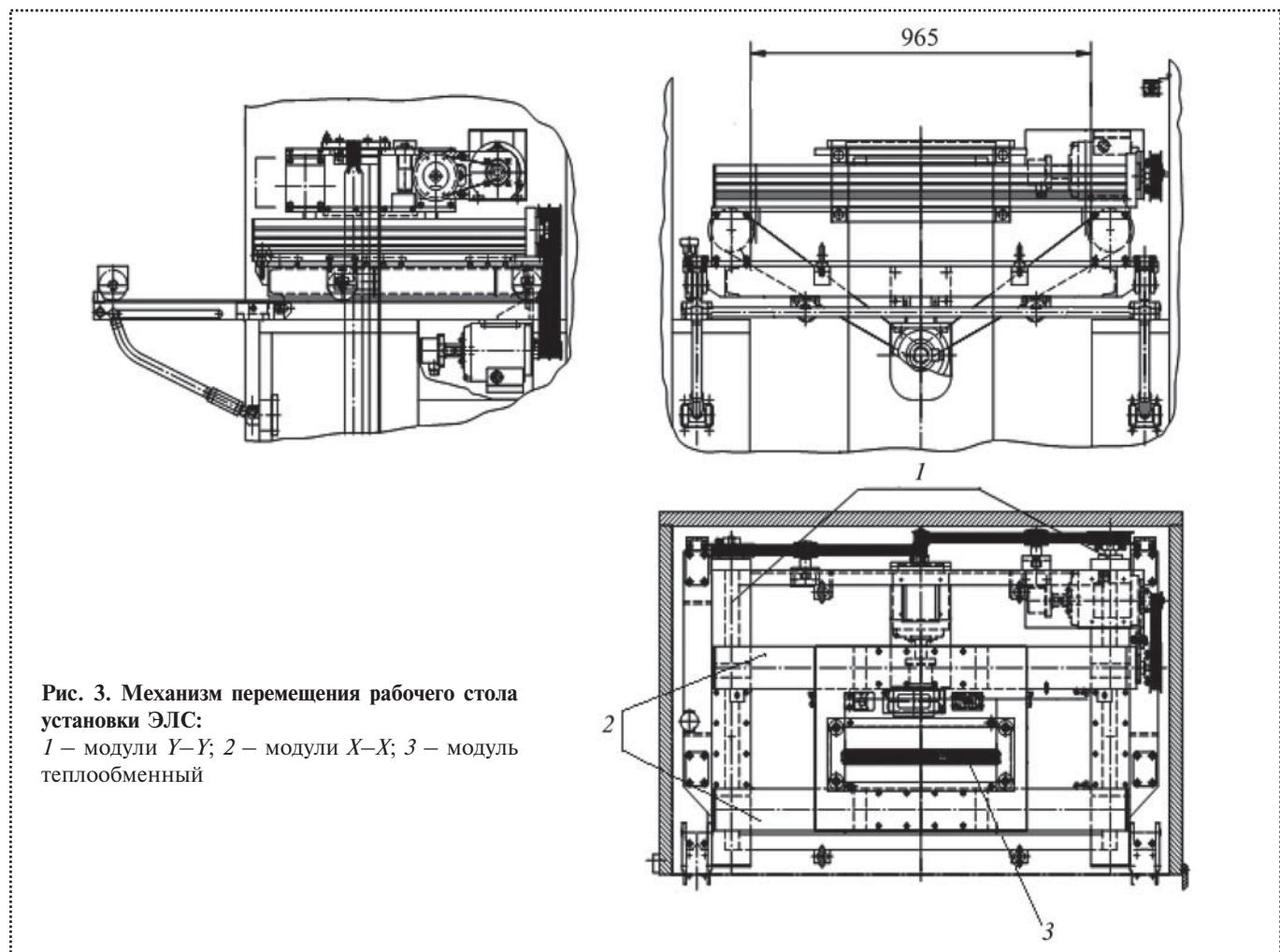
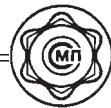


Рис. 3. Механизм перемещения рабочего стола установки ЭЛС:

1 – модули $Y-Y$; 2 – модули $X-X$; 3 – модуль теплообменный

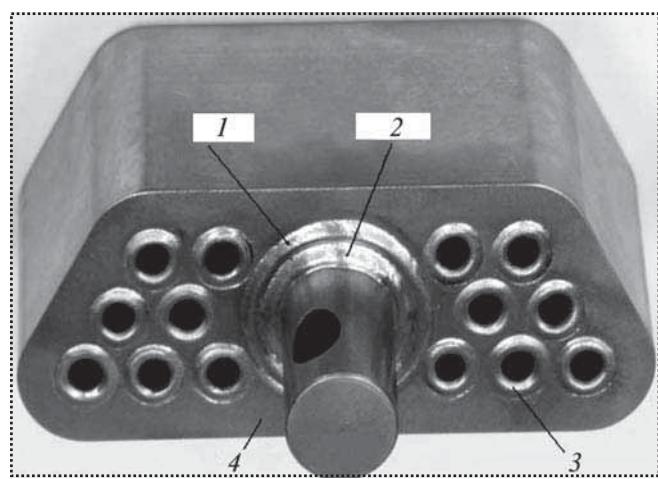


Рис. 4. Образец-имитатор модуля теплообменного оборудования:

1 и 2 – сварные швы диаметром 27 и 20 мм; 3 – сварные швы теплообменных элементов диаметром 8 мм; 4 – трубная доска

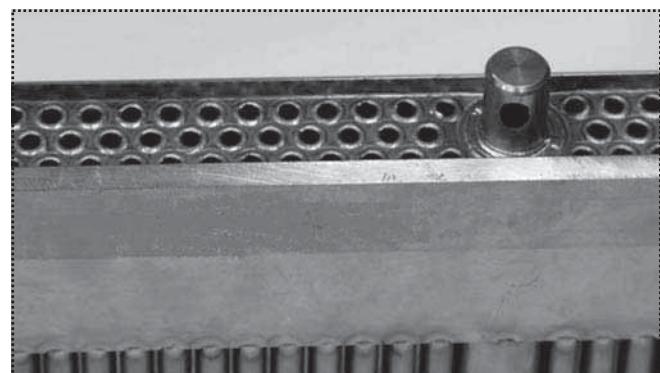


Рис. 5. Фрагмент модуля теплообменного оборудования

Библиографический список

1. Назаренко О.К., Лашкевич Д.В. Состояние и перспективы применения электронно-лучевой и лазерной сварки: информ. обзор. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1989. 17 с.

2. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко и др. Киев.: Наукова думка, 1987. 256 с.



УДК 621.791.048

В.В. Карабанов, канд. техн. наук, И.О. Бохоров
тел. 8-498-520-34-72

Пайка теплообменников

Рассмотрены способы и технологические приемы пайки теплообменников различных конструкций и исполнений, а также применяемые паяемые материалы и технологические среды при их изготовлении. Представлены технология подготовительных работ и оптимальные режимы пайки.

Ways and processing methods of the soldering of heat exchangers of various designs and executions, and also applied soldered materials and technological environments are considered at their production. Technology of a preparatory work and optimum modes of the soldering were presented.

Ключевые слова: радиатор, пайка, пластинчато-ребристый теплообменник, пластинчатый теплообменник, охлаждающие трубы, флюсовая ванна, пайка в печах, гетер-пористый, алюминий, титан.

Keywords: radiator, soldering, lamellar and ridge heat exchanger, lamellar heat exchanger cooling tubes, flux bathtub, soldering in furnaces, getter-porous, aluminum, titan.

Пайка, как процесс образования монолитного соединения металлов, основан на естественных свойствах жидкого и твердого металлов вступать в атомное взаимодействие. При их контактировании образуется металлическая связь, обеспечивающая получение монолитного соединения. Этими же свойствами металлов обусловлены процессы формирования паяного соединения: смачивание, растекание жидкого металла по поверхности твердого, затекание в капиллярные паяльные зазоры.

Роль человека в процессе пайки ограничивается участием в подготовительной стадии и заключается в сборке изделия под пайку и создании условий для атомного взаимодействия соединяемых металлов, которые могут поддерживаться в процессе пайки в автоматическом режиме.

Высокая автономность металлургического процесса пайки позволяет после соответствующей подготовки проводить пайку одновременно нескольких изделий (групповая пайка), а также паять конструктивно сложные изделия, имеющие мно-

жество труднодоступных для соединения участков с большой протяженностью.

К таким сложным конструкциям относят теплообменники, широко используемые в промышленности.

В зависимости от назначения теплообменники (теплообменные аппараты) имеют различное конструктивное исполнение и могут быть изготовлены из любых конструкционных материалов (медь, алюминий, титан, сталь) и их сплавов.

Теплообменники являются важнейшими агрегатами современных транспортных средств и оборудования энергоемких производств.

Важнейшей операцией при производстве теплообменников является пайка. В зависимости от материала теплообменников и их конструктивных особенностей применяют большое разнообразие технологических приемов и способов пайки, а также паяльных материалов.

Широкие потенциальные возможности пайки как способа сборки позволяют непрерывно совершенствовать производство теплообменников, повышать их качество и эффективность.

Типичными представителями теплообменной аппаратуры являются общезвестные автомобильные радиаторы (водяные и масляные), имеющие небольшие размеры и состоящие из сердцевины с припаянными к ней резервуарами—емкостями для приема и слива жидкости. Сердцевина представляет собой паяную конструкцию, содержащую систему трубок круглого или плоского профиля с нанесенными на них и припаянных к ним охлаждающими и опорными пластинами.

Непрерывно нарастающий спрос автомобильной промышленности на радиаторы может быть удовлетворен только при высокоскоростной технологии их производства. Современное производство радиаторов осуществляется на комплексных механизированных и автоматизированных линиях, обеспечивающих высокую производительность, стабильное качество и благоприятные условия труда [1].

Традиционное производство медно-латунных автомобильных радиаторов (рис. 1) включает опе-

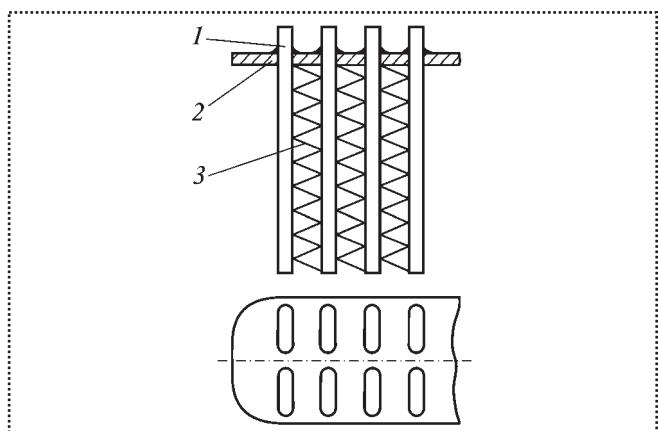
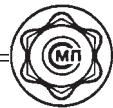


Рис. 1. Медно-латунный теплообменник:

1 – плоская трубка; 2 – трубная пластина; 3 – гофрированная пластина

рации по штамповке охлаждающих пластин и по формированию охлаждающих трубок из рулонной латунной ленты.

Предварительно латунную ленту покрывают слоем оловянно-свинцового припоя ПОС-30 путем протягивания ее через ванну с раствором хлористого цинка и ванну с расплавленным припоеем при температуре 380...390 °C. После удаления с поверхности ленты избытка припоя, промывки и охлаждения на облученную ленту наносят 5 %-ный раствор касторового масла и подают на операции по штамповке пластин и формированию трубок [1].

Сборку и пайку сердцевин радиаторов производят на автоматической линии. Пайка сердцевин является одной из самых ответственных и сложных операций при производстве автомобильных радиаторов. Флюсование радиаторов перед пайкой производят в камере путем дождевания с последующим удалением избытка флюса продуванием сердцевины сжатым воздухом.

Офлюсованная сердцевина поступает в камеру предварительного нагрева, затем в камеру пайки, в которой ее нагревают потоком нагретого воздуха. Перепад температуры по объему теплообменника не должен превышать 10 °C. При достижении температуры пайки припой, нанесенный на радиаторные трубы, плавится и затекает в места их контакта с охлаждающими пластинами.

Агрегаты автоматической линии снабжены контрольно-измерительной системой автоматического регулирования тепловых режимов, имеют пульт управления, их обслуживает один оператор.

На готовую сердцевину припаивают два бачка и радиатор поступает на контроль и приемку.

Практика производства медно-латунных радиаторов основана на использовании в процессах лужения и пайки жидких флюсов на основе цинка, что ведет к загрязнению атмосферы и промышленных водных стоков цинком, медью, хлором, приводит к необходимости проведения природоохраных мероприятий, удорожающих производство.

Наметилась тенденция к применению безфлюсовой пайки. На оренбургском предприятии ОАО "Радиатор" разработан способ безфлюсовой пайки медно-латунных радиаторов с использованием доступной, безопасной, экологически чистой среды, состоящей из перегретого водяного пара с микродобавками активных веществ [2]. Разработанная технология пайки радиаторов позволяет существенно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

В качестве активных веществ используют водный раствор соляной кислоты, вносимый в паяльную среду в количестве 0,5...1,0 % об. или хлористый аммиак. При пайке в активной газовой среде (АГС) при определенных условиях обеспечивается требуемый уровень смачиваемости и растекания припоя.

С повышением температуры способность хлористого водорода взаимодействовать с паяльными металлами снижается. В интервале температур 400...700 °C хлористый водород инертен по отношению к меди и латуни. После пайки в АГС не требуется дополнительных операций по промывке изделий и их антикоррозионной обработке.

В Оренбургском предприятии ОАО "Радиатор" разработаны и созданы промышленное оборудование для лужения в АГС цельнотянутых латунных трубок размерами 17,5×1220 мм методом облива (А.с. № 1787080) и установка для пайки сердцевин радиаторов с нанесением технологического покрытия – припоя ПОС 40 в газофлюсующей среде.

Качество изделий, полученных в АГС, отвечает всем требованиям стандартов. Технологию, подобную технологии производства автомобильных радиаторов, применяют при производстве трубных пакетов секций радиаторов тепловозов на головном предприятии ХК "Лугансктепловоз" [3].

Секции радиаторов являются основными элементами водной системы тепловоза, обеспечивающей охлаждение дизеля. Объем производства пред-



приятия составляет 170 000 секций различных модификаций в год.

Технология изготовления секций сложна и разнообразна вследствие значительного числа соединяемых элементов с большими расстояниями между ними и разнообразием материалов: медь, латунь, сталь. Наибольшее применение имеют водовоздушные секции с размерами 141×151×203 мм. Все модификации секций имеют типовую конструкцию и отличаются друг от друга сечением трубок, габаритами и массой.

Секция состоит из двух трубных пакетов размерами 1220×151×91 мм, каждый из которых представляет собой набор медных рельефных охлаждающих пластин, надетых на плоскоovalные латунные трубы, концы которых вставлены в отверстия решеток трубных коробок из меди МЗ и припаяны к ним. На поверхность трубок методом лужения наносят слой припоя ПОССу 40–2 толщиной 0,07...0,04 мм. Охлаждающие пластины получают штамповкой из медной ленты.

Сборку и пайку пакетов производят на автоматической линии. После сборки пакет флюсируют в ванне с водным раствором хлористого цинка с последующей продувкой и сушкой на воздухе. Затем пакеты поступают в камеру предварительного нагрева, откуда после нагрева до 220 °C их подают в камеру пайки, нагреваемую горячим воздухом. При достижении температуры пайки (280 °C) слой припоя на трубках расплавляется и заполняет соединительные зазоры между трубками и пластинами. Для качественного заполнения сборочных зазоров трубы в секции при пайке должны находиться в вертикальном положении.

В последнее время в автомобильной и других отраслях промышленности производство медно-латунных радиаторов (теплообменников) заменяют производством алюминиевых радиаторов [1, 4].

Алюминий не уступает по теплопроводности меди и латуни, но имеет более низкую стоимость и высокую коррозионную стойкость, хорошо деформируется и является полноценным заменителем меди и латуни при изготовлении радиаторов.

По конструкции и технологии изготовления алюминиевые радиаторы объективно отличаются от медно-латунных. Особенности вызваны разницей в физико-химических свойствах этих металлов.

При производстве алюминиевых теплообменников в России и за рубежом применяют высоко-

температурную пайку в печах с осущенным воздухом или в среде инертного газа, а также безфлюсовую пайку (в вакууме). При производстве алюминиевых автомобильных радиаторов наиболее широко применяют высокотемпературную пайку в расплавленном флюсе.

В качестве припоя используют силумин с содержанием кремния 8,0...12,5 %. Припой наносят на алюминиевые листы и ленты при производстве рулонного проката. Высокотемпературный припой обладает хорошей однородностью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и растекаемостью по алюминию, которую можно повысить введением в состав припоя незначительного количества активатора (до 1 %). Благодаря высокой пластичности силумина плакированные листы и ленты могут подвергаться гибке, штамповке, как обычный прокат.

На ведущих заводах организован комплексный механизированный и автоматизированный технологический процесс производства радиаторов. Как и при изготовлении медно-латунных радиаторов, так и при производстве алюминиевых, наиболее ответственной операцией является пайка сердцевин радиаторов. Автоматизированная линия пайки в расплавленном флюсе состоит из печи предварительного нагрева, флюсовой ванны, установки для очистки изделий от флюса, сушильной камеры и конвейера.

Перед сборкой детали радиатора проходят химическую обработку с последующей промывкой и сушкой. Грязь, масло и оксидную пленку удаляют с поверхности деталей в щелочном составе из акустической и кальцинированной соды, тринатрийфосфата и эмульгатора ОП-8, вводимого для коагуляции выделяемого жира и для предотвращения повторного попадания его на очищенные поверхности деталей. Продукты травления удаляют с поверхности деталей осветлением в 15...40 %-ном растворе азотной кислоты. Обработку сопровождают тщательной многократной промывкой деталей в горячей и холодной воде. Обработанные детали проходят сушку в сушильной камере при температуре 120...200 °C.

Очищенные и осущенные детали поступают на автоматы по сборке сердцевин радиаторов. При сборке необходимо выдерживать определенные равномерные зазоры между соединяемыми деталями. Собранные сердцевины алюминиевых радиаторов должны быть спаяны не позднее двух суток после их химической обработки.

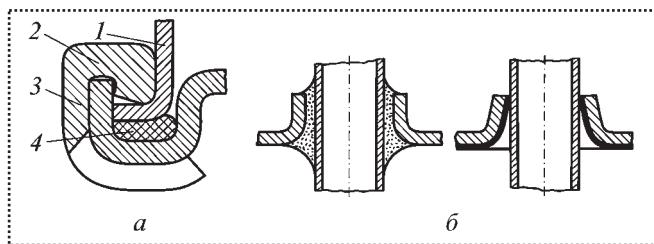


Рис. 2. Соединение опорной пластины с охлаждающими трубками (а) и сердцевины с бачками (б):

1 – элемент бачка; 2 – охлаждающий элемент; 3 – спецпрофиль; 4 – резиновый уплотнитель

Собранные сердцевины паяют в приспособлениях, фиксирующих их геометрические параметры в процессе пайки.

Конструкция паяных соединений определяется формой соединяемых деталей. Разработанное для алюминиевых радиаторов тавровое соединение пластин с охлаждающими трубками (рис. 2) обеспечивает качественное формирование паяного шва с правильными галтелями. Подобная конструкция соединения позволяет вести качественную сборку, так как отбортовка отверстий на пластинах под двойным углом раскрытия, равным 90° , обеспечивает относительно легкое вхождение концов трубок при их запрессовке в трубные пластины. Процесс сборки осуществляется на механизированных приспособлениях.

Размер зазора на сборку определяется двумя факторами: расчетной толщиной плакирующего слоя припоя и заданным допуском на сборку узла. Для получения качественных паяных соединений суммарная толщина плакирующего слоя и зазора должна быть не больше 0,25 мм. При пайке в воздушной или нейтральной среде зазор должен составлять 0,10...0,15 мм. На значение зазора при пайке влияют химический состав припоя и режим пайки.

Качество пайки во многом зависит от выбранного положения изделия и конструкции приспособления, которое должно быть жестким и иметь минимальные массу и поверхность соприкосновения с паяемым изделием. При разработке приспособления необходимо учитывать разницу в коэффициентах теплового расширения металла приспособления и изделия. Приспособление изготавливают из коррозионно-стойкой хромоникелевой стали.

Качественное приготовление флюса и припоя, стабильность заданных режимов обработки обеспечивают прочные, герметичные паяные соедине-

ния. Заданные режимы обработки сердцевин радиаторов обеспечивает автоматическая система управления процессом.

Печь предварительного нагрева обеспечивает достаточно равномерный нагрев сердцевины радиатора с погрешностью $\pm 10^\circ\text{C}$. Для поддержания требуемой температуры изделия перед погружением в расплавленный флюс (соль) предусматривают дополнительную камеру подогрева, расположенную над зеркалом расплавленного флюса. Эта камера обеспечивает также более полное стекание избыточного припоя, не допуская его затвердевания после пайки.

Верхнюю границу расплавленного флюса устанавливают, исходя из условия работы ванны в течение не менее одной смены без необходимости добавления новой порции флюса. Для получения равномерной температуры по объему сердцевины радиатора она должна быть погружена в ванну так, чтобы над ней находился слой расплавленного флюса высотой в пределах 80...200 мм.

Пополняют рабочую ванну путем перелива рафинированного флюса из технологической ванны, расположенной рядом.

Специально разработанный для пайки алюминиевых радиаторов флюс отличается от известных флюсов [5, 6] меньшей токсичностью, летучестью, хорошей растворимостью, а также высокой жидкотекучестью, электро- и теплопроводностью, относительной стабильностью в процессе работы. Флюс активно разрушает оксидную пленку на поверхности алюминия, хорошо вытесняется припоеем из зазоров ввиду его меньшей плотности. Температура плавления флюса ниже температуры плавления припоя на $100\ldots150^\circ\text{C}$. Флюс имеет высокую однородность в расплавленном состоянии и образует незначительный осадок.

Продукты взаимодействия флюса с алюминиевым сплавом АМц и силuminовым припоеем после пайки сердцевины нейтрализуют и удаляют в растворе азотной кислоты.

Объем расплавленного флюса в ванне подбирают с учетом обеспечения равномерного нагрева изделия и приспособления в пределах заданной точности температурного интервала ($\pm 3^\circ\text{C}$) и времени операции. Температура ванны регулируется автоматически. Время выдержки изделия во флюсовой ванне составляет 60...70 с. Этого времени достаточно для окончательного нагрева теплообменника до



температуры пайки и для оптимального протекания диффузионных процессов при пайке.

После окончания пайки остатки флюса с паянного изделия удаляют промывкой в двух ваннах с горячей водой, оснащенных магнитострикционными преобразователями. После обработки в растворе азотной кислоты сердцевину радиатора промывают водой, продувают сжатым воздухом для удаления влаги и подают в сушильную камеру с температурой 120...150 °C.

В расплавах флюса происходит электрохимическое окисление алюминия ионами гидроксила, что снижает эффект флюсования. Влага, присутствующая в расплаве флюса, приводит к гидролизу его компонентов. Для повышения активности флюса необходимо периодическое обезвоживание расплава флюса.

Традиционное применение для обезвоживания флюсовых ванн отрезков алюминиевого проката — труб, листов и проволоки — неэффективно ввиду большой длительности этого процесса (от нескольких часов до нескольких суток). Более эффективным способом обезвоживания флюсовых ванн является применение порошков, изготовленных из сплавов алюминия с марганцем (8...15 %), при этом возникает необходимость очистки ванн от шлака, выпадающего на дно ванны. Лучшие результаты по обезвоживанию флюсовых ванн дает использование порошков из хрупких сплавов алюминия с магнием (до 70 %).

В результате электрохимического взаимодействия частиц порошка с влагой снижается унос флюса из ванны с паяным изделием, повышается прочность паяных соединений в 1,5...1,8 раза. Количество порошка, вносимого в ванну, должно составлять 0,4...0,6 % от массы флюса [7].

Паянную сердцевину радиатора после проверки на герметичность для повышения коррозионной стойкости и придания ей товарного вида направляют на химическое оксидирование. Готовую паянную сердцевину радиатора направляют на участок окончательной сборки.

Длительные эксплуатационные испытания алюминиевых радиаторов различного назначения, установленных на грузовых и легковых автомобилях, показали их высокую надежность и эффективность. По ряду показателей алюминиевые радиаторы пре-восходят стандартные медно-латунные. Так, масса алюминиевых радиаторов в 1,3...2,5 раза меньше,

при этом есть возможность дальнейшего ее снижения за счет усовершенствования конструкции.

Алюминиевые радиаторы обладают лучшим теплообменом. Их коррозионная стойкость не уступает стойкости стандартных радиаторов, эксплуатируемых в тех же условиях без применения антифриза. Введение в незначительных количествах ингибитора коррозии НГ-203А или масла АС-8 в охлаждающую жидкость алюминиевых радиаторов повышает их коррозионную стойкость. Средний ресурс их работы — не менее 250 000 км пробега автомобиля.

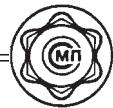
Установка на автомобили алюминиевых радиаторов для водяного охлаждения двигателя повышает долговечность крышки блока цилиндров, корпуса водяного насоса и других деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, поскольку исключается наличие в воде ионов меди, вызывающих электрохимическую коррозию.

Значительные преимущества алюминиевых теплообменников способствовали развитию их производства и в других отраслях промышленности.

Пайка теплообменников погружением в расплавленный флюс обеспечивает быстрый и равномерный нагрев теплообменника, полное удаление с поверхности деталей оксидной пленки и надежную защиту паяемого металла от окисления в процессе пайки. Технологические операции пайки в расплаве флюса легко механизируются и автоматизируются, что обеспечивает высокую производительность процесса изготовления теплообменников и их качество. Поэтому пайку теплообменников погружением в солевые (флюсовые) расплавы широко применяют в различных отраслях промышленности при массовом и мелкосерийном производстве теплообменников.

Составы применяемых солевых расплавов и характеристики печей-ванн для пайки представлены в работах [6, 7]. Современные печи-ванны оборудованы загрузочным устройством, работающим по автоматическому циклу. Автоматическое поддержание температуры флюсового расплава и параметров термического цикла процесса пайки обеспечивают применением систем регулирования с обратной связью. Печи-ванны выпускает отечественная промышленность.

При разработке технологии пайки алюминиевых теплообменников необходимо учитывать свойства паяемого материала и припоя. Во флюсовой ванне хорошо паяются изделия из алюминиевого



сплава АМц, не упрочненного термической обработкой, и сплава АВ.

Температура пайки изделий из сплава АМц составляет 650 °C, что позволяет использовать припой с относительно высокой температурой плавления: силумины, П575А, П590А [7].

Сплав АВ имеет более низкую температуру солидуса и склонен к пережогу. Поэтому температура пайки сплава не должна превышать 685 °C. При пайке применяют эвтектический силумин. Наиболее универсален для обоих сплавов силуминовый припой.

Силумины в зависимости от содержания кремния имеют различную температуру плавления и позволяют получать прочноплотные и коррозионно-стойкие паяные соединения. С увеличением содержания кремния прочность припоя возрастает. Так при повышении содержания кремния от 5,8 до 11,7 % прочность припоя возрастает на 30 %.

Однако увеличение содержания кремния усиливает растворение паяемого металла в припое, что может привести к сквозному разрушению тонкостенной насадки в теплообменнике. Поэтому оптимальный режим пайки определяют с учетом совместимости паяемого металла, припоя, флюса и конструктивных особенностей теплообменника, а также условий его эксплуатации. Наиболее эффективна пайка в расплаве флюса марки Ф435М, имеющего температуру активного действия 500 °C. Температура пайки составляет 600...630 °C. В этом температурном интервале достигается максимальная скорость флюсования теплообменников.

С увеличением плакирующего слоя припоя увеличивается растворимость в нем паяемого металла. Поэтому для каждого состава припоя следует назначать оптимальную толщину плакирующего слоя [7].

Качество паяных соединений в теплообменниках обеспечивается, если при использовании силуминового припоя, содержащего менее 9 % Si, толщина плакирующего слоя припоя составляет 100 мкм, а при содержании в припое более 9 % Si толщина плакирующего слоя припоя должна составлять 30 мкм. При пайке теплообменников с тонкостенными деталями предпочтительно применять доэвтектический силумин, содержащий 7,5 % Si, у которого температура ликвидуса ниже температуры активного действия флюса Ф435М.

Качество паяных соединений зависит от температуры и времени пайки. Превышение температуры пайки приводит к выделению из припоя крем-

ния и к расширению площади шва, что снижает его прочность. Аналогичное влияние на паяные соединения оказывает продолжительность выдержки при пайке.

Оптимальными условиями пайки теплообменников из сплава АМц в растворе флюса Ф435М силуминовым припоеем являются: температура пайки – 620 °C, время выдержки – 3 мин. При этом применяют как эвтектический, так и доэвтектический силумин. При пайке теплообменников из сплава АВ применим только эвтектический силумин с температурой плавления 577 °C, которая ниже оптимальной температуры флюсования. Для разрушения оксидной пленки увеличивают выдержку при температуре 577 °C, после чего форсируют нагрев до температуры пайки.

Паяльные флюсы гигроскопичны, поэтому их остатки при эксплуатации теплообменника могут вызвать интенсивную коррозию его деталей. Обязательным условием производства теплообменников является тщательное удаление с их поверхности остатков флюса после пайки путем многократной промывки в холодной и горячей воде.

При флюсовой пайке теплообменников в печах с воздушной атмосферой или в среде инертных газов (аргоне) обеспечивается высокая степень механизации и автоматизации технологических операций, достигается высокая производительность производства. В печь можно помещать одновременно сразу несколько теплообменников. При этом обеспечивается высокая равномерность нагрева теплообменников (± 10 °C).

Высокая равномерность нагрева теплообменников в печах исключает деформирование конструкции при пайке. Расход флюса при пайке в печах в 5 раз меньше, чем при пайке во флюсовой ванне. Пайку в печах применяют как при изготовлении теплообменников небольшими партиями, так и при серийном производстве. Крупногабаритные теплообменники паяют в камерных печах с подвижным полом.

После подготовки поверхности детали теплообменника собирают в приспособлении, на места пайки наносят пастообразный флюс и припой в дозируемых количествах. После этого подготовленный теплообменник подают в предварительно нагретую печь с вентилируемой атмосферой. Флюсование теплообменника можно производить и окунанием его в раствор флюса. С целью активизации



поверхности алюминия при пайке в печах применяют флюсы, содержащие хлористый цинк. С целью снижения растворяющей способности флюса при пайке тонкостенных теплообменников хлористый цинк заменяют хлористым оловом или хлористым кадмием.

При пайке силуминовым припоем применяют высокоактивный флюс 34A. Наличие в этом флюсе хлористого цинка приводит в процессе пайки к легированию поверхности элементов теплообменника цинком, что обеспечивает катодную защиту металла от питтинговой коррозии.

Широкое применение при пайке в печах находят флюсы марок Ф3, Ф5, Ф57А, содержащие в своем составе хлористый цинк и хлористый кадмий.

С целью снижения расхода флюса воздушную атмосферу печи заменяют средой нейтральных газов.

Для качественного затекания расплава припоя в сборочные зазоры и вытеснения из них флюса зазор не должен превышать 0,1 мм.

После пайки в печах обязательна тщательная промывка паяного теплообменника в холодной и горячей воде до полного удаления остатков флюса с его поверхности.

В условиях массового производства теплообменников наиболее эффективна пайка в проходных конвейерных печах, обеспечивающих высокую экономическую эффективность производства.

Для улучшения экологических условий производства предлагается использовать вместо флюса 34A коррозионно-неактивный флюс на основе фторалюминатов калия, который является аналогом известного флюса "NOCOLOC", с добавками, повышающими активность флюса [8].

Порошковый флюс наносят на поверхность изделия в виде 10...15 %-ной водной суспензии в количестве 15 г/м², а на практике – обычно 5 г/м², что в 3–4 раза меньше, чем при использовании флюса 34A. Пайку проводят в среде азота. После нанесения флюса на поверхность изделия его сушат при температуре 180...200 °C.

После пайки флюс образует плотную кристаллическую пленку толщиной 3...5 мкм, имеющую высокую адгезию к поверхности алюминия, нерастворимую в воде, не вызывающую коррозию алюминия и не требующую отмыки паяного изделия. Токсичность флюса "NOCOLOC" ниже, чем у флюса 34A.

В качестве антикоррозионной обработки применяют химическое цинкование элементов радиатора в щелочном растворе с диффузионным отжи-

гом в процессе пайки. Образуемый протекторный слой эффективно защищает теплообменник от питтинговой коррозии.

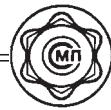
Возрастающие требования по защите окружающей среды от загрязнений и понижению стоимости производства привели к необходимости разработки безфлюсовых технологий пайки алюминиевых теплообменников в вакууме и в нейтральных газовых средах.

Пайку алюминиевых конструкций в восстановительных или защитных газовых средах не применяют из-за трудностей удаления прочной, плотной, химически стойкой оксидной пленки. Она не разлагается в вакууме, достигаемом в современных газовых печах, не растворяется в паяемом металле, не восстанавливается даже такими активными газовыми средами, как водород и трехфтористый бор, успешно применяемыми при пайке других металлов и сплавов.

Экологически чистый способ вакуумной пайки теплообменников обладает рядом технико-экономических преимуществ по сравнению с флюсовой пайкой [9]:

- повышается качество и надежность паяных соединений, так как устраняется опасность возникновения не пропаянных глухих участков;
- повышается плотность паяных швов, так как обеспечиваются благоприятные условия для дегазации припоя;
- нет необходимости удалять остатки флюса с поверхности изделий после пайки;
- обеспечиваются здоровые условия производства;
- отпадает необходимость в применении дорогостоящих флюсов.

Однако при нагреве металлов в вакууме или нейтральных газовых средах ни один из механизмов самопроизвольного удаления оксидных пленок с поверхности металлов не реализуется. Поэтому при этих способах пайки используют специальные технологические приемы, которые позволяют в этих условиях привести поверхность металлов, в том числе таких активных, как алюминий и титан, в состояние, достаточное для осуществления процесса пайки. Одним из таких приемов является нагрев алюминиевых теплообменников в вакууме с использованием паров магния [10], который обладает более высоким сродством к кислороду, чем алюминий и способен восстановить его из оксида. Оксидная пленка магния имеет низкие защитные



Химический состав и механические свойства силуминовых припоев, предназначенных для пайки теплообменников из алюминиевых сплавов

Припой	Содержание элементов, %*			$T_{пл}$, °C	σ_B , МПа
	Cu	Si	Mg		
Al—Cu—Mg	28...32	—	4...6	505...510	70...90
Al—Si—Mg	—	6...8	1...2	605...610	80...100
	—	8...10	1...2	590...600	100...120
	—	10...12	1...2	575...580	120...140
Al—Cu—Si—Mg	25...28	6...8	1...2	525...530	70...90
	8...20	8...10	1...2	550...560	100...120
	8...10	10...12	1...2	555...565	100...120
	3...5	10...12	1...2	570...575	110...130

* Al — остальное.

свойства и не препятствует контакту припоя с паяемым металлом — алюминием.

Пары магния выполняют и другую функцию. При любой степени разрежения в вакуумной камере всегда остаются пары воды и кислород, которые, при наличии паров магния, связываются в его оксиды.

Существуют разные способы введения магния. Он может входить в состав паяемых алюминиевых сплавов или вводится в припой при его выплавке. Также магний можно размещать в виде навесок в рабочем пространстве вакуумной печи.

При нагреве в процессе пайки происходит интенсивное испарение магния, связывающего кислород. Образующиеся оксиды магния постепенно удаляют вакуумным насосом.

С уменьшением содержания кислорода и увеличением парциального давления паров магния возникают условия для восстановления алюминия из его оксидов. На поверхности алюминия образуется рыхлый слой оксида магния, обеспечивающий доступ паров магния к поверхности алюминия. В результате этого происходит адсорбция паров магния на поверхность алюминия с образованием легко-плавкой жидкой фазы, которая, растекаясь под оксидной пленкой, взламывает и разрушает ее. В момент плавления припой, растекаясь по поверхности паяемого металла, образует паяное соединение и освобождается от оксидной пленки.

Безфлюсовую пайку теплообменников из алюминиевых сплавов производят силуминовыми припоями, нанесенными на поверхность алюминиевых лент и листов при их изготовлении. Химиче-

ский состав и механические свойства припоеv, с учетом легирования их магнием, в качестве металла-активатора, представлены в таблице. Эти данные являются исходными при разработке технологии безфлюсовой пайки теплообменников.

Прочность, герметичность и другие свойства паяных соединений зависят от технологичности конструкции. При конструировании используютстыковые, нахлесточные, тавровые и телескопические соединения. Однако, предпочтительней применять нахлесточный тип соединения. Такие типы соединений применяют в теплообменниках рамочной конструкции, которые состоят из набора рамок, гофрированных приставок, расположенных внутри рамок и разделительных пластин из листов алюминиевых сплавов, плакированных с обеих сторон силуминовым припоеем. Две разделительные пластины и рамка между ними со вставленной гофрированной приставкой образуют элементарную ячейку.

Конструкция теплообменника может состоять из различного числа ячеек, отличающихся размерами и формой, что позволяет получать узлы с необходимыми характеристиками.

Все детали теплообменника просты в изготовлении, их легко собрать в пакет, а паяемые участки расположены в самом удобном для пайки горизонтальном положении.

Подготовку поверхностей деталей теплообменника производят по стандартной технологии, включающей щелочное травление и осветление в растворе азотной кислоты. Разрыв во времени между операциями травления и пайкой не должен



превышать 24 ч. Теплообменник собирают в сборочно-паяльном приспособлении, состоящем из двух облегченных плит толщиной 10...15 мм. Ограничительные пластины приспособления изготавливают из коррозионно-стойкой стали, между которыми с помощью шпилек стягивают собранный под пайку теплообменник до появления плотного контакта соединяемых поверхностей.

Пайку теплообменника проводят в условиях вакуума ($10^{-2}...10^{-3}$ Па), в атмосфере паров магния, равномерно распределенных по рабочему объему печи. В печи обеспечивается равномерный нагрев теплообменника с градиентом температур по его объему, не превышающим ± 10 °C.

Примером эффективного применения вакуума при пайке является серийная технология изготовления радиаторов из алюминиевых сплавов для передвижных компрессорных станций [10].

Радиатор представляет собой паяно-сварной узел, состоящий из пакета размером 650×620×100 мм, верхнего и нижнего привариваемых коллекторов. Пакет радиатора состоит из набора разделительных пластин, соединенных между собой гофрированными проставками и рейками с помощью пайки, образующими каналы с перекрестным направлением потоков воздуха и масла.

Радиатор должен сохранять герметичность в процессе эксплуатации при давлении масла в каналах до 0,5 МПа. Гофрированную проставку радиатора изготавливают из ленты алюминиевого сплава АМц толщиной 0,2 мм. Разделительные пластины изготавливают из листов алюминиевого сплава АМцПС, плакированных с обеих сторон доэвтектическим силумином (содержание кремния 8,9...9,0 %), который выполняет роль припоя. Толщина плакирующего слоя припоя составляет 60...80 мкм при общей толщине листа 0,8 мм.

Пайку проводят в специально разработанной вакуумной печи периодического действия. Печь предусматривает одновременную пайку шести пакетов радиаторов. Две печи при двухсменной работе способны обеспечить выпуск 6000 радиаторов в год. Рабочая температура в печи 650 °C. Печь занимает площадь 60 м².

При сборке радиатора плотное прилегание деталей обеспечивают с помощью специального захватного приспособления, которое обеспечивает фиксацию собранных деталей в процессе термического цикла пайки. Плотное прилегание деталей в

местах соединения обеспечивается специальным подвижным устройством.

Конструкция печи предусматривает принудительное охлаждение паяных радиаторов в нейтральном или защитном газе.

При нагреве пакетов радиаторов в интервале температур 200...400 °C значительное газовыделение адсорбированной влаги ведет к уменьшению вакуума. Поэтому при снижении вакуума производят выдержку до его восстановления до $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Оптимальная температура пайки составляет 605...620 °C, выдержка при температуре пайки – 6...10 мин.

Перепад температур по шести пакетам при температуре пайки не должен быть более 15 °C. Охлаждение паяных радиаторов проводят вместе с печью в вакууме до температуры 150...200 °C. Термический цикл закладывают в систему программного управления режимом пайки.

Разработанный технологический процесс вакуумной пайки рекомендован к применению при производстве радиаторов автотранспортной техники, тепловозов и в других отраслях промышленности.

Применение вспомогательного контейнера при пайке небольших пластинчато-ребристых теплообменников позволяет использовать более простое оборудование, чем при высоком вакууме. При этом сокращается расход магния. В вакуумных печах существенное влияние на качество процесса пайки оказывают остаточные газы в камере. С целью ограничения их влияния на процесс пайки необходимо ограничивать паяльное пространство и использовать активные металлы-геттеры, способные улавливать и связывать остаточные окислительные компоненты паяльной атмосферы.

При вакуумной пайке алюминиевых теплообменников применяют сложное и дорогостоящее оборудование, засорение которого оксидами магния требует его периодической разборки и чистки. Устраняют этот недостаток использованием вспомогательного контейнера из нержавеющей стали с затвором, уплотненным титановой губкой. Для создания паров магния навески магния размещают под титановой губкой, исходя из расчета 0,007 г/л объема контейнера. Пайку теплообменников в таком контейнере, помещаемом в вакуумную печь, можно проводить в условиях низкого вакуума (10 Па) при температуре 605 °C с выдержкой 5 мин [11].

При пайке происходит активное испарение магния, пары которого поступают в контейнер, очи-

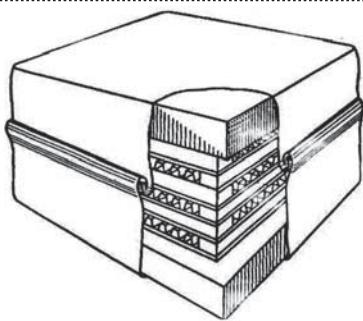


Рис. 3. Схема "ампулизации" теплообменника алюминиевой фольгой при сборке под пайку

щая его атмосферу и, взаимодействуя с паяемым металлом, обеспечивают полное смачивание поверхности деталей теплообменника из сплава АМц расплавленным эвтектическим силумином.

Стабильность качества титановой губки сохраняется в течение 25 термических циклов. Регенерацию губки производят при температуре 850...860 °C в течение 60 мин в вакууме (10^{-2} Па).

Максимального ограничения пространства, окружающего паяемое изделие, можно добиться путем "ампулирования" паяемого теплообменника, т.е. путем его плотного экранирования фольгой из алюминия или титана [12], поглощающими окислительные компоненты атмосферы (рис. 3). В этом случае качество процесса пайки будет определяться не остаточными газами печи, а микроусловиями, возникающими вблизи зоны пайки. В ограниченных полостях между паяемым изделием и экраном образуется собственный локальный вакуум. Давление и состав газов в этих полостях зависит от взаимодействия остаточного газа с поверхностью экрана и его герметичности.

Во внутреннем объеме паяемого теплообменника устанавливается микроклимат с низким содержанием кислорода, паров воды и других окисляющих газов. Это вызвано поглощением остаточных газов внутренней поверхностью ампулирующей фольги.

При нагреве в вакуумной печи "ампулированного" теплообменника внутри его образуется атмосфера, эквивалентная атмосфере, создаваемой при вакууме 10^{-3} Па. При внутренней площади ампулы, превышающей площадь поверхности паяемого изделия, влияние остаточных газов на процесс пайки исключается.

Замена воздушной атмосферы, окружающей изделие, инертным газом или вакуумом понижает содержание кислорода и влаги до уровня примесей в

инертном газе или до давления остаточных газов при вакуумировании.

При пайке алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников в вакууме (10^{-3} Па) наблюдалось отрицательное влияние печной среды, которое вызывало окисление поверхности алюминия и препятствовало растеканию силуминового припоя в интервале температур 600...640 °C. При пайке в той же печи "ампулированного" теплообменника без паров магния происходило качественное растекание припоя.

Пайку крупногабаритных массивных изделий наиболее эффективно осуществлять в среде инертных газов. Наиболее эффективной является разработанная в последнее время в ОАО "Криогенмаш" технология пайки алюминиевых крупногабаритных пластинчато-ребристых теплообменников (ПРТ) в среде аргона. ПРТ широко применяют в криогенной технике, в энергоемких воздухоразделятельных установках (ВРУ) и в других отраслях промышленности [13, 14].

Пластинчато-ребристые теплообменники (рис. 4) представляют собой пакеты, собранные из большого числа параллельных пластин, конструктивно связанных с помощью пайки с теплообменной насадкой и проставочными брусками. Пространство между каждой парой пластин, заполненных насадкой, является каналом, по которому проходит газ или жидкость. Размеры ПРТ достигают нескольких метров, вес – несколько тонн.

Экономические показатели ВРУ в значительной степени определяются эффективностью теплообменных аппаратов, составляющих почти половину всего оборудования установки.

Пайку крупногабаритных ПРТ ранее осуществляли во флюсовых ваннах, затем в специальных вакуумных печах в присутствии паров магния. Этот

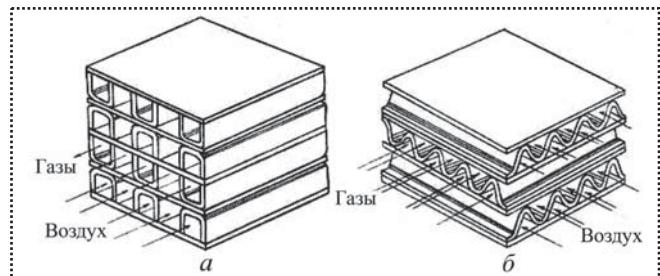


Рис. 4. Конструкции пластинчато-ребристых теплообменников:
а – противоточный; б – с перекрестным током

способ пайки характеризуется длительным термическим циклом, сложным управлением процессом нагрева, необходимостью периодической очистки стенок камеры и вакуумного оборудования от конденсата магния.

Разработанный способ безфлюсовой пайки крупногабаритных ПРТ в среде очищенного аргона (А.с. № 2124971) не имеет отмеченных недостатков. Пайку выполняют силуминовыми припоями (не содержащими магний), нанесенными в виде плакированного слоя на поверхность деталей.

Аргон перед началом пайки очищают при помощи специального катализатора НКО-2-3Ф от примесей кислорода и паров воды. При нагреве в результате термодегазации камеры, сборочного приспособления и паяемого изделия происходит непрерывное изменение состава атмосферы. При этом в камеру помещают пластины пористого титана, который служит геттером. Процесс пайки в таких условиях осуществляется в практических безокислительной среде. Паяные в таких условиях соединения ПРТ имеют хорошо сформированные галтели. Прочность соединений на срез составляет 85...90 МПа.

Нагрев в атмосфере аргона легированных магнием алюминиевых сплавов практически не приводит к испарению магния. Присутствие магния в паяемых сплавах увеличивает микротвердость паяного шва, что связано с диффузией магния в жидкую фазу. Это способствует разрушению оксидной

пленки, увеличению растекания припоя и к повышению прочности паяного соединения.

На основе результатов проведенных исследований разработан наиболее рациональный термический цикл пайки крупногабаритных ПРТ в среде аргона (рис. 5) с применением встроенных в камеру аэродинамических нагревателей (АДН), включающий несколько этапов нагрева и вакуумирования камеры, обеспечивающих минимальный перепад температур в объеме пакета ПРТ и необходимый состав атмосферы в камере. Распределение тепла по объему пакета ПРТ осуществляется в основном за счет теплопроводности элементов теплообменника. Регулируют темпы нагрева ПРТ путем изменения числа работающих АДН.

На первом этапе ПРТ вместе с геттером устанавливают в камеру пайки, предварительно нагретую до 400 °C, и проводят вакуумирование до $(5...10)^{-2}$ Па. Затем камеру заполняют аргоном, прошедшим каталитическую очистку от остатков кислорода и паров воды. Дополнительную очистку аргона осуществляют непосредственно в камере с помощью неиспаряемого геттера — пористого титана, присутствие которого позволяет вести пайку в практических безокислительной атмосфере.

На следующих этапах (при температуре теплообменника 300 °C) камеру вновь вакуумируют до $(5...10)^{-2}$ Па для удаления физически адсорбированных газов и паров воды. При температуре ПРТ

500 °C производят последнее вакуумирование — до давления 1...10 Па. Этот этап необходим для выравнивания поля температур в объеме ПРТ и для удаления газов из паяльных зазоров, кристаллизационной влаги, а также для разрушения сплошности оксидной пленки на поверхности проставочных брусков в результате испарения магния из алюминиевого сплава. Магний в паровой фазе выполняет роль геттера непосредственно в паяльном зазоре.

На качество паяных соединений большое влияние оказывают температурно-временные режимы пайки [14]. Учитывая, что при пайке крупногабаритных пакетов ПРТ, масса которых составляет несколько тонн, время от температуры расплавления припоя до окончания процесса пайки находится в пределах 3...5 ч, что приводит к интенсивному протеканию растворочно-диффузионных процессов в местах

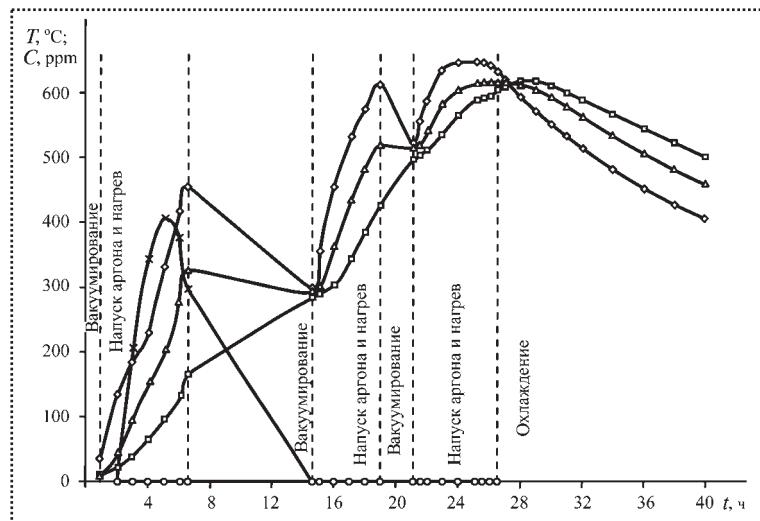
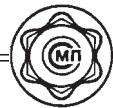


Рис. 5. Термический цикл пайки пакета ПРТ размерами 1050×850×3000 мм и изменение содержания кислорода (—○—) и паров воды (—×—) в камере в процессе нагрева:

—○— температура газа; —□— минимальная и —△— максимальная температура пакета



пайки. При большой толщине плакирующего слоя припоя на галтельных участках соединений могут появляться дефекты – подрезы на насадке, снижающие прочность паяных соединений. Поэтому толщина слоя припоя должна составлять 80...120 мкм, при этом паяльный зазор должен находиться в пределах 0,05...0,10 мм.

Качество паяных соединений ПРТ зависит от полноты удаления жировых и оксидных пленок с поверхности деталей. Поэтому операция подготовки поверхности ПРТ к пайке в технологическом процессе их изготовления является одной из основных.

При подготовке ПРТ к пайке отказались от применения традиционных экологически вредных способов травления в щелочном и кислотном растворах.

Российская компания "ECTОС" создала и выпускает универсальные очищающие средства, представляющие собой водорастворимые, нетоксичные, взрывопожаробезопасные, полностью биоразлагаемые жидкости широкого спектра применения, в составе которых присутствуют поверхностно-активные вещества и компоненты, способные удалять с поверхности алюминиевых сплавов жировые загрязнения и оксидные пленки. Из большого ассортимента щелочных и кислотных очистителей для подготовки ПРТ к пайке в среде аргона был выбран 10 %-ный раствор кислотного очистителя ЕС-ФФ, который отличается высокой маслодемкостью и при периодической корректировке состава ванны сохраняет высокую активность при обработке значительно большей поверхности, чем другие очистители (щелочные и кислотные) [15].

Разработанная экологически чистая технология подготовки поверхности деталей ПРТ в растворе ЕС-ФФ позволяет полностью исключить из технологии изготовления ПРТ операции щелочного и кислотного травления.

Для сохранения высокого качества паяных соединений геттер, размещаемый в камере пайки, необходимо заменять после 120...150 ч нагрева. Регенерацию пористого титана проводят путем отжига в вакууме $5 \cdot 10^{-2}$ Па при температуре 850 °C в течение 1 ч.

Для реализации разработанного процесса пайки ПРТ изготовлен и эксплуатируется паяльный агрегат – технологический комплекс, включающий:

- термобарокамеру со встроенными в нее АДН, рассчитанную на пайку теплообменников размерами 3000×1200×100 мм;

- систему каталитической очистки и подачи аргона в камеру;
- систему вакуумирования камеры;
- систему контроля и управления работой агрегата;
- средства загрузки и выгрузки пакетов ПРТ.

По разработанной технологии в ОАО "Криогенмаш" наложен промышленный выпуск паяных крупногабаритных ПРТ размерами от 500×300×300 до 3000×1200×100 мм.

Нагрев ПРТ до температуры пайки 615 °C проводят в среде аргона. При этом в интервале температур 500...600 °C геттер интенсивно поглощает кислород и пары воды, создавая в камере безокисильную атмосферу. Пакет охлаждают до 400 °C в камере, затем на воздухе.

С развитием промышленности возрастают требования к прочности конструкций и механизмов. Повышение прочности паяных алюминиевых конструкций – теплообменников осуществляется по двум направлениям: разработки новых алюминиевых сплавов, сохраняющих свои механические свойства при нагреве выше 600 °C, а также создания новых или совершенствования существующих припоеv с целью снижения температуры плавления, в первую очередь по сравнению с силуминовыми припоями СИЛ0 и СИЛ1.

Созданы легированный кадмием алюминиевый сплав 01515 и гранулированный сплав 01416 на основе системы "алюминий – переходный металл", получаемый при скоростном охлаждении и др.

При высокой температуре нагрева легированных сплавов может происходить их разупрочнение вследствие коагуляции упрочняющих фаз. При пайке изделий из высоколегированных алюминиевых сплавов силуминовыми припоями (СИЛ0 и СИЛ1), температура плавления которых выше температуры солидуса паяемых сплавов, происходит их пережог и потеря механических свойств. Для сохранения механических свойств высоколегированных алюминиевых сплавов можно применять припой марки 34A на основе системы Al–Si–Cu, имеющий температуру плавления ниже 570 °C. Однако, вследствие повышенной пористости паяных швов, данный припой можно применять только при изготовлении неответственных изделий.



В последнее время для пайки теплообменников из легированных алюминиевых сплавов разработаны новые припои на основе системы Al–Si–Ge с температурой плавления ниже, чем у силуминовых припоев. Снижение температуры плавления сплавов, содержащих германий, основано на том, что германий с кремнием образует непрерывный твердый раствор, а с алюминием взаимодействует по диаграмме состояния эвтектического типа, не образуя хрупких интерметаллических фаз. Вследствие этого в зависимости от содержания германия температура плавления сплавов изменяется от 424 °C при отсутствии кремния до 577 °C при отсутствии германия.

На основе системы Al–Si–Ge разработаны припои с содержанием германия до 25 % с высокими технологическими свойствами, с более низкой по сравнению с силуминовыми припоями температурой плавления. Их применяют для пайки ответственных алюминиевых конструкций с повышенной прочностью с высокой коррозионной стойкостью паяных соединений [16].

Наиболее изученными и отработанными припоями этого класса являются припой Ал4Г (содержит 4 % Ge), имеющий температуру плавления 570 °C и припой Ал10Г (содержит 8...10 % Ge) и имеющий температуру плавления 560 °C, рекомендованный для пайки алюминиевых теплообменников. Для изготовления теплообменников разработана технология прокатки листов толщиной 0,4 мм из сплавов АД31, 01515, 01523, плакированных припоеем Ал10Г толщиной 0,07...0,09 мм.

По технологическим свойствам (смачивание, растекание, затекание в капиллярный зазор) припой Ал10Г не уступает силумину СИЛ1. Оптимальный зазор при пайке составляет 0,2 мм. Температура пайки при использовании припоя СИЛ1 590 °C, а припоя Ал10Г – 560 °C. Более низкая температура плавления припоя Ал10Г позволяет использовать его при ступенчатой пайке и при ремонте теплообменников.

Германий имеет высокую упругость паров. Дополнительное легирование припоя цезием снижает испаряемость германия и стабилизирует химический состав паяного шва.

Применение алюминиевых сплавов, дополнительно легированных скандием, гранулированного алюминиевого сплава 01419П, сплава АД31 и некоторых других в сочетании с припоями системы

Al–Si–Ge обеспечивает предел прочности паяемого металла конструкции на уровне 200 МПа.

При использовании припоев этой системы можно проводить флюсовую пайку с использованием флюса 34А или безфлюсовую пайку в вакууме. Внедрение этих припоев при пайке теплообменников проводилось в НПО им. С.А. Лавочкина, НПО "Техномаш" и в других организациях.

Снижение температуры пайки до 560 °C за счет использования припоя Ал10Г позволило повысить прочность паяных конструкций на 30...40 МПа по сравнению с использованием припоеv на основе эвтектического силумина.

Ответственные теплообменники, эксплуатируемые в агрессивных средах, могут быть изготовлены из титана и его сплавов. Титан имеет высокую удельную прочность в широком интервале температур и высокую коррозионную стойкость в большинстве агрессивных сред.

При пайке титановых конструкций применяют припой на алюминиевой основе – ВПр16, ВПр25.

При пайке в вакууме стабильное смачивание поверхности титановых изделий алюминиевыми припоями происходит при температуре, превышающей температуру плавления алюминия. При этой температуре, вследствие газонасыщения и структурных изменений, ухудшаются механические свойства титана и его сплавов.

Очистка поверхности титановых изделий от оксидной пленки является недостаточным условием для активирования поверхности титана и смачивания его алюминиевыми припоями при температурах ниже 750 °C. Введение в состав паяльной атмосферы паров свинца позволяет значительно активизировать процесс смачивания титана алюминиевыми припоями. Температура начала смачивания титана эвтектическим силумином снижается до 600 °C, усиливается процесс растекания припоя при остаточном давлении в пределах 5...8 Па [17].

Газонасыщение титана при нагреве начинается при 600 °C даже в глубоком вакууме ($3 \cdot 10^{-3}$ Па). Экранирование паяемого изделия путем использования негерметичных контейнеров из коррозионно-стойкой стали или титана снижает газонасыщение титана, однако полностью его не предотвращает.

Экранирование изделия путем использования вспомогательного контейнера с затвором, уплотненным титановой губкой, позволяет полностью предотвратить газонасыщение титана при нагреве

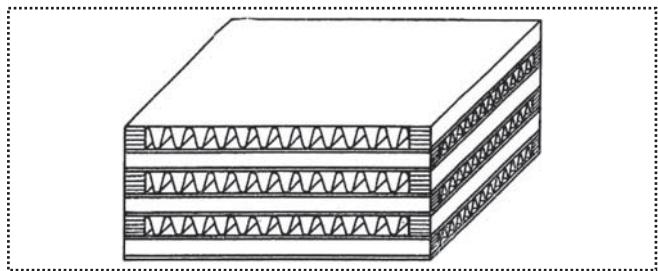


Рис. 6. Пластинчатый теплообменник

в вакууме (5...8 Па) и создать легко воспроизводимые условия, благоприятные для очистки поверхности титана от оксидной пленки.

Применение экрана и неиспаряемого геттера при указанном разряжении обеспечивают сохранение прочности и пластичности титана на исходном уровне во всем температурном интервале.

Важным этапом в развитии различных видов новой техники явилось создание и внедрение пластинчатых теплообменников, обладающих высокой компактностью и тепловой эффективностью (рис. 6).

Пластинчатые теплообменники содержат тонколистовые плоские и гофрированные элементы, причем каждая пара гофр соединена с плоским элементом методом пайки. Пластинчатые теплообменники применяют для охлаждения лопаток турбин и регенерации тепла газотурбинных двигателей, а также для кондиционирования воздуха в летательных аппаратах и многих других устройствах.

К теплообменникам данного типа предъявляют повышенные эксплуатационные требования:

- равнопрочность соединений;
- сохранение механических свойств материалов после пайки;
- коррозионная стойкость в агрессивных средах;
- циклическая прочность при криогенных (-196°C) и повышенных (500°C) температурах.

Это повлекло за собой необходимость применения для их изготовления более прочных материалов, чем медь и ее сплавы. Высокотемпературные теплообменники (температура рабочего газа достигает 700°C) изготавливают из коррозионно-стойкой стали 1Х18Н10Т (не относится к жаропрочным сталим) [18]. Технология изготовления таких конструкций должна обеспечить минимальное разупрочнение паяемого металла.

Теплопередающая поверхность (матрица) пластинчатых теплообменников представляет собой многослойную объемную конструкцию, детали которой могут быть изготовлены из материала толщиной от 0,03 мм до нескольких миллиметров.

Соединение между собой элементов теплообменника связано с получением большого числа паяных швов значительной протяженности, основная часть которых находится внутри конструкции. Это предопределяет использование пайки, как основного метода изготовления пластинчатых теплообменников. Для присоединения к матрице переходных элементов используют сварку.

Традиционно пайку теплообменников из коррозионно-стойкой стали проводили в печах с восстановительной средой или в проточных нейтральных газах с введением газообразных флюсов. Для пайки использовали в качестве припоев главным образом медь и марганец содержащие припой на медной или никелевой основе. Припой, содержащий марганец, не проявляет высокой коррозионной активности по отношению к коррозионно-стойким сталим. Пайку осуществляли в приспособлениях, обеспечивающих создание в конструкции капиллярных зазоров.

Основная проблема процесса пайки теплообменников – устранение деформаций, возникающих вследствие неравномерного нагрева изделия при пайке. В ИЭС им. Е.О. Патона разработана технология вакуумной пайки пластинчатых теплообменников из стали 1Х18Н10Т. Изделия нагревают с помощью двух пар графитовых нагревателей, подключенных к независимым источникам питания [19]. При этом обеспечиваются высокие скорости нагрева теплообменника и небольшие градиенты температур по его объему, вызывающие напряжения в изделии, не превышающие предела текучести стали 1Х18Н10Т.

Особенностью разработанного термического цикла пайки является то, что изделие нагревают с постоянно возрастающей скоростью, достигающей максимального значения в области температуры пайки. Ускоренный нагрев в диапазоне высоких температур способствует сохранению свойств паяемого металла, ограничивает его эрозию и позволяет использовать припой, содержащий легко испаряемые компоненты, например марганец.

Существующие марганец содержащие припой на основе никеля обладают невысокой коррозионной активностью, но требует высокой температуры



пайки (около 1200 °C). Нагрев нержавеющей стали до этой температуры вызывает снижение ее механических свойств. Поэтому в ИЭС им. Е.О. Патона разработан припой системы Ni–Mn (ПР-Н58Ф), хорошо растекающийся по нержавеющей стали при 1100 °C. Пайка в вакууме этим припоем соединений с узким зазором (до 0,05 мм) обеспечивает их высокую прочность при нормальных и повышенных температурах, а также коррозионную стойкость и жаропрочность паяных изделий.

Припой на поверхность деталей следует наносить равномерно, дозированно, чтобы обеспечить равномерную и минимальную осадку пакета теплообменника в процессе пайки.

Порошковый припой на разделительные пластины наносят в составе суспензии, состоящей из 5%-го раствора акриловой смолы в ацетоне и порошка припоя с размерами частиц 0,063 мм в соотношении 1:2.

Стабильное формирование паяных соединений и сведение к минимуму эрозии паяемого металла достигается при содержании припоя в количестве 0,05 г/см².

В ИЭС им. Е.О. Патона была разработана установка У-845, которая позволяет производить сжатие изделия в любой момент процесса пайки. Осуществление процесса сжатия изделия в процессе пайки расширяет технологические возможности уменьшения зазоров и регулирования толщины жидкого припоя. При этом повышается качество паяных соединений.

Элементы сжатой матрицы фиксируют с помощью стяжек и пакет устанавливают в печь между графитовыми нагревателями. Уменьшения сборочных зазоров достигают в процессе нагрева за счет линейного расширения деталей изделия, устанавливаемого между графитовыми пластинами, и принудительного их сжатия перед началом плавления припоя при достижении температуры пайки (900...920 °C) [19].

Разработанные технологический процесс пайки пластинчатых теплообменников и оборудование для его осуществления внедрены в производство при изготовлении теплообменников различного назначения.

В процессе совершенствования технологии пайки пластинчатых теплообменников из коррозионно-стойкой стали были разработаны более технологичный припой и простой способ нанесения по-

рошковых и многокомпонентных припоев на изделие перед пайкой [20].

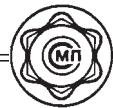
Для равномерного нанесения порошка припоя на поверхность теплообменника и закрепления его на ней было использовано свойство термопластов передавать при нагреве в пластичное состояние. В качестве полимера использована акриловая смола БМК-5. На ее основе подобрана связка, получившая марку С-89-1, следующего состава: растворитель Р5 – основа, БМК-5 – 8...9 %, диоктилсебацинат – 0,6 %.

Припой наносят по следующей технологии. На детали теплообменника краскораспылителем наносят слой связки толщиной 10...12 мкм. После высыхания нанесенной связки производят сборку теплообменника, заполняют его порошковым припоеем и нагревают до температуры 100 °C. После выдержки, необходимой для выравнивания температуры нагрева изделия, излишки порошка высыпают, а частицы порошка, находившиеся в контакте со связкой, прилипают к ней. Засыпку теплообменника порошком припоя производят в положении, когда его каналы находятся под углом 45° к горизонтальной плоскости. Для улучшения заполнения каналов изделие подвергают вибрации. Эти операции осуществляют на специально созданной установке.

Разработанная установка (А.с. № 654071) состоит из двух контейнеров с люками для пересыпки порошка, вибростенда с грузовым столом, двух терморегуляторов шахтного типа с приборами теплоконтроля и подъемно-транспортного устройства. Разработан комплексный технологический процесс нанесения порошковых припоев и пайки стальных пластинчатых теплообменников (А.с. № 648364), имеющей следующую последовательность операций.

Все детали обезжиривают электрохимическим способом и на разделительные пластины наносят связку С-89-1. После сушки связки собирают пакет теплообменника, который помещают в контейнер и нагревают в терmostате до 100 °C.

Подогретый теплообменник заполняют порошком припоя и вновь нагревают до 100 °C. Из теплообменника удаляют припой, не приклеившийся к связке. Теплообменник с нанесенным на его поверхность припоеем помещают в контейнер для пайки и устанавливают в печь предварительного нагрева. После нагрева контейнера с теплообменником до температуры 800...900 °C контейнер направляют в печь для пайки.



При серийном производстве очередной теплообменник заполняют порошком припоя из ранее заполненного и нагретого теплообменника.

В последние годы разработан новый способ пайки теплообменников из коррозионно-стойких сталей с применением многослойного композиционного припоя системы Cr–Ni–Mn [21]. Разработанная технология позволяет получать качественные паяные соединения при температуре пайки, равной оптимальной температуре термической обработки сталей, и повысить содержание хрома в паяном шве до уровня, близкого к содержанию его в паяемых сталях. Технология обеспечивает получение паяных соединений, равнопрочных стали 12Х18Н10Т и снижение массы теплообменника на 30 %.

Нанесение элементов композиционного припоя на паяемые поверхности в виде многослойных покрытий позволяет целенаправленно легировать паяемый металл на межфазных границах элементами с более высокой температурой плавления и с высоким модулем упругости.

Применение многослойного композиционного припоя системы Cr–Ni–Mn в виде покрытий позволяет обеспечить:

- качественное смачивание соединяемых поверхностей при температуре ниже критической, что сохраняет исходные механические свойства паяемых металлов;
- контакт с Ni и Mn позволяет за счет высокой активности расплава в процессе контактного плавления избежать перегрева припоя и снизить температуру пайки до 1150 °C;
- осуществить процесс пайки при зазоре 60...70 мкм, что позволяет избежать образования в шве химической неоднородности в процессе кристаллизации, получить эффект контактного упрочнения шва, реализовав эффект "аномальной растворимости" в малых зазорах, и увеличить в шве содержание тугоплавких элементов – Cr, Ni, Fe;
- исключить заплавление охлаждающих каналов теплообменников малого сечения (4×5 мм и менее) за счет дозированного количества припоя;
- реализовать эффект дополнительного контактного упрочнения за счет легирования соединяемых поверхностей хромом;
- обеспечить повышенную концентрацию хрома за счет двухстороннего растворения в расплаве Ni–Mn без влияния Fe;

- снизить эрозию соединяемых поверхностей за счет уменьшения растворимости до 25 % в расплаве Cr–Ni–Mn.

С целью получения соединений с максимальным содержанием хрома в металле шва, целесообразно двухстороннее нанесение хрома на паяемые поверхности при оптимальном соотношении толщин покрытий для гладких поверхностей: Cr – 5,5 ± 1 мкм, Ni – 15 ± 5 мкм, Mn – 30 ± 5 мкм; для ребристых поверхностей: Cr – 5,5 ± 1 мкм, Ni – 6 ± 1 мкм. Прочность полученных соединений превышает прочность стали 12Х18Н10Т и достигает 700 МПа.

Режим процесса пайки этих соединений: температура пайки 1150 °C с выдержкой 30 мин и с последующим охлаждением до 1000 °C и выдержке в течение 60 мин (гомогенизирующий отжиг). При таком режиме пайки содержание хрома в металле шва достигает уровня его содержания в сталях ВНС16 и ВНС25 (13...15 %).

Данную технологию применяли при пайке стальных теплообменников, имеющих гладкую (сталь 12Х18Н10Т) и оребренную (стали ВНС16 и ВНС25) поверхности.

В зависимости от конструкции теплообменника и условий его эксплуатации к процессу пайки могут быть предъявлены определенные требования, обеспечивающие качество и надежность теплообменника.

Под надежностью понимают способность паяной конструкции выдерживать внутренние и внешние нагрузки без изменения служебных характеристик изделия в требуемом интервале времени. К внутренним нагрузкам относят термические напряжения и нагрузки, вызванные конструкционными и технологическими факторами. К внешним нагрузкам относят термокоррозионные, циклические и температурные воздействия окружающей среды.

Для теплообменных аппаратов системы охлаждения двигателя тепловоза, испытывающих в процессе эксплуатации кроме статических вибрационные, ударные и температурные воздействия, припой и способы пайки выбирают исходя не только из необходимой прочности конструкции, но и с учетом коррозионной стойкости по отношению к теплоносителю в процессе эксплуатации.

Пайку теплообменных аппаратов тепловозов осуществляют в пламени ацетилено-кислородной горелки. При пайке трубок с трубными решетками применяют припой на серебряной основе с температурой пайки 800 °C. При пайке трубных решеток

с коллектором применяют латунный припой Л62 (температура пайки 950 °C) [22].

Значительные габариты и масса теплообменника усложняют его сборку и установку необходимых для пайки зазоров в конструкции. На практике размеры сборочных зазоров достигают 0,3...0,7 мм. При смещении теплообменных трубок от оси отверстия в трубной решетке зазоры могут достигать 0,9...1,1 мм, что приводит к образованию непропая между трубками и в местах сопряжения их с трубными решетками.

Наиболее опасными участками в теплообменных аппаратах являются паяные швы между теплообменными трубками и места их сопряжения с трубными решетками. Наиболее частой причиной выхода из строя теплообменника является трещина между трубкой и трубной решеткой, возникающая вследствие значительных знакопеременных напряжений в трубках из-за вибрации двигателя и теплосмен воздуха. В этих условиях происходит увеличение зазора между соединяемыми элементами, охрупчивание металла трубок и рост зерна в них, что вызывает образование и развитие усталостных трещин в трубках и шве.

Для предупреждения образования усталостных трещин в швах необходимо, чтобы сборочные зазоры не превышали 0,1...0,2 мм, а температура пайки составляла 720...730 °C при продолжительности времени пайки 0,8...1,2 мин.

Сложность и трудоемкость сборки крупных изделий с необходимостью обеспечения узких и равномерных зазоров препятствует применению пайки при их изготовлении. Задача сборки была решена путем заполнения широких и неравномерных зазоров металлическим порошковым наполнителем [23], создающим в зазоре систему капиллярных каналов (рис. 7).

Этот способ применяют при высокотемпературной пайке в вакууме кожухов трубчатых теплообменников. В качестве наполнителя пригоден порошок с частицами размером более 50 мкм, который свободно заполняет зазор. При меньшей грануляции порошка затруднено удаление газов при вакуумировании. При большой толщине решетки возможен выброс порошка при вакуумировании или образование непропаянных участков при заполнении зазора расплавленным припоеем.

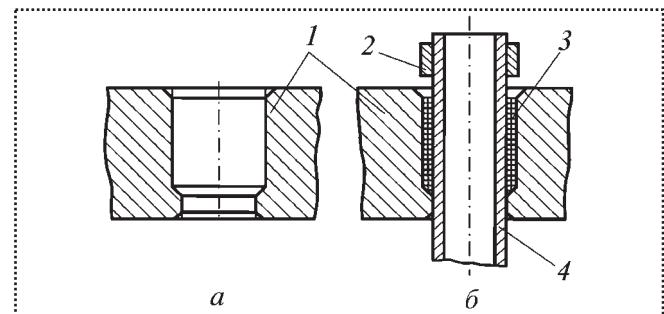


Рис. 7. Соединение трубы с трубной решеткой, паяное по широкому зазору:

а – отверстие в трубной решетке; б – подготовленное к пайке соединение; 1 – трубная решетка; 2 – припой; 3 – наполнитель в паяльном зазоре; 4 – труба

При нагреве в вакууме до температуры пайки в местах контакта частиц между собой и с паяемым металлом происходит диффузионная пайка.

Важную роль играет форма частиц наполнителя. В наполнителе с частицами трубчатой и кристаллической формы, имеющими острые выступы, диффузионное схватывание происходит при температуре более 900 °C. При шаровидной форме частиц паяный каркас образуется при температуре более 1000 °C.

Неподвижный каркас из частиц наполнителя создает равномерную сеть капиллярных каналов для перемещения припоя и препятствует образованию усадочных дефектов при кристаллизации расплава, так как при взаимодействии с расплавленным припоеем образованные перемычки между частицами сохраняются.

Для пайки теплообменников из высоколегированных и углеродистых сталей пригодны наполнители из порошка железа и железоникелевых сплавов. Наиболее предпочтительны порошки с низким содержанием кислорода, полученные при распылении расплава азотом или инертным газом. Эти частицы, имеющие сферическую форму, хорошо заполняют сборочные зазоры. При использовании такого наполнителя формируется прочный, пластичный и плотный паяный шов. Важным признаком пригодности порошка в качестве наполнителя является газовыделение при температуре пайки, которое не должно превышать 0,2 см³/г.

Выбор наполнителя и припоя зависит от состава паяемого металла и требований, предъявляемых к теплообменнику. Для пайки стальных теплообменников в качестве припоя применяют медь, медно-марганцевые, медно-никелевые и никелевые сплавы.



Металл наполнителя, припой и режим пайки выбирают так, чтобы расплавленный припой мог переместиться в зазоре с наполнителем на расстояние, равное толщине решетки. Предпочтительно такое сочетание наполнителя и припоя, при котором их взаимодействие после завершения пропитки наполнителя расплавом припоя приводит к кристаллизации металла шва при изотермической выдержке.

По этому методу изготавливают кожухотрубчатые стальные теплообменники из стали 20 и стали 12Х18Н9Т, длиной 1000 мм при диаметре трубной решетки 900 мм и толщине 80 мм. Диаметр трубок теплообменника составляет 4...14 мм.

У серийно выпускаемых ребристых теплообменников тепловой контакт между ребрами проволочной спирали и трубкой осуществляется за счет натяжения спирали при ее навивке на трубку. Малый точечный механический контакт ребра с трубкой не позволяет использовать тепловые возможности конструкции. Кроме этого, такой контакт со временем ослабевает. Для улучшения теплового контакта решено закреплять ребра спирали на трубке с использованием пайки [24]. Трубки сечением 12×1 мм изготавливают из алюминиевого сплава АМц. Спираль изготавливают из проволоки диаметром 2 мм того же сплава.

Соединение спирали с трубкой осуществляют с применением контактно-реактивной пайки через медное покрытие на трубках. Гальваническое нанесение слоя меди на поверхность трубок длиной 6 м осуществляют в пиросфатной ванне. Толщина медного покрытия составляет 4...6 мкм. Намотку на трубы проволочной спирали осуществляют с некоторым натягом. Оребренные проволочными спиралью трубки сворачивают в спираль диаметром 600 мм и помещают в вакуумную печь, накрывая цилиндрическим экраном из титанового листа.

Для обеспечения атмосферы печи парами магния под экраном помещают ленты из сплава АМц5 толщиной 0,3 мм. При нагреве по достижению температуры 360...390 °С производят промежуточную выдержку в течение 5 мин для дегазации. Время нагрева составляет 2 ч. Одновременно паяют 5 плетей длиной по 6 м. Площадь теплового контакта в каждом соединении составляет 10...12 мм². Натеков припоя и эрозии элементов конструкции не происходит.

В компрессорных установках для ступеней высокого давления применяют компактные, простые алюминиевые трубчатые охладители газа. Для повышения эффективности теплопередачи необходимо

димы трубы с оребренной поверхностью. Оребрение труб позволяет увеличить площадь теплообмена в 17–20 раз.

Оребрение труб производят при прокатке или путем приварки ребристых элементов к поверхности труб. Эти методы оребрения труб эффективны при диаметрах труб выше 16 мм.

В большинстве случаев, особенно при малых диаметрах труб (6...12 мм) оребрение труб производят намоткой на них проволочной спирали с последующей пайкой [25].

В процессе эксплуатации оребренного охладителя поток охлаждающего воздуха, перемещаясь в лабиринте проволочного оребрения, многократно разрывается, турбулизуется, что значительно интенсифицирует теплообмен.

Работоспособность и долговечность спирально-проводочного оребрения определяются надежностью закрепления спирали на трубе, осуществляемого низко- или высокотемпературной пайкой.

Низкотемпературную пайку, производимую с применением оловянно-свинцовых припоев, осуществляют в том случае, если трубы в процессе эксплуатации не нагреваются выше 100 °С.

Высокотемпературную пайку осуществляют с применением шликерных припоев, представляющих собой смесь мелкодисперсных частиц металлических порошков, взвешенных в водно-спиртовом растворе бентонита.

Шликерное покрытие на поверхность оребренных трубок наносят методом окунания с последующей сушкой покрытия для удаления водного раствора спирта. На поверхности трубок остается удерживаемый адгезионными силами слой металлического порошка. При нагреве в вакууме порошок оплавляется, формируются соединение спирали с трубой и покрытие на спирали и трубе.

Теплообменники со спиральным проволочным оребрением применяют при различных условиях эксплуатации, в зависимости от которых определяют состав порошковой смеси.

Для охлаждения сжиженного агрессивного газа сжатым воздухом в сухом помещении трубы с проволочной спиралью из углеродистой стали покрывают шликером, содержащим смесь медного порошка с порошком карбонильного железа.

Для охлаждения агрессивного газа влажным воздухом применяют трубы и проволоку из коррозионно-стойкой стали, а пайку проводят с применением шликера, состоящего из смеси порошков никеля, кремния и бора. Образуемый при пайке



расплав припоя формирует качественное соединение проволоки с трубой с высокой коррозионной стойкостью.

При наличии в газе абразивных частиц применяют шликер, содержащий смесь порошков никеля, хрома, кремния и бора. Такая смесь при расплавлении в вакууме создает припой-покрытие износостойкого и коррозионно-стойкого сплава, представляющее собой твердый раствор, армированный комплексными силицидами и боридами хрома, что обеспечивает высокую твердость и износостойкость покрытия и паяных швов. Никелевая основа твердого раствора обеспечивает коррозионную стойкость оребрения.

При компактных размерах теплообменника соединение труб с проволочной спиралью и труб с трубными решетками пайкой производят одновременно в вакуумной печи.

Компактность теплообменников с оребренными трубами позволяет применять их наряду с пластинчато-ребристыми теплообменниками в блоке системы воздушного охлаждения.

Библиографический список

1. Губин В.И. Производство автомобильных радиаторов. Горький: Вятское книжное издательство, 1979. 126 с.
2. Пославский А.П. Исследование и разработка технологии пайки автомобильных радиаторов в среде перегретого водяного пара. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 1978.
3. Технология пайки трубных пакетов секций радиаторов тепловозов в ХК "Лугансктепловоз" / Г.Г. Басов и др. // Автоматическая сварка. 2003. № 9. С. 37–40.
4. Технология изготовления алюминиевых радиаторов / В.И. Оленев и др. // Автомобильная промышленность. 1976. № 4. С. 27–31.
5. Справочник по пайке / Под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
6. Сторчай Е.И. Флюсовая пайка алюминия. М.: Металлургия, 1980. 124 с.
7. Никитинский А.М. Пайка алюминия и его сплавов. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.
8. Технологии флюсовой пайки теплообменников экологически чистым флюсом / В.Р. Гофман и др. // Сварочное производство. 1975. № 3. С. 37–41.
9. Акиндинов И.М., Суслов А.А. Вакуумная пайка алюминия и его сплавов. Матер. семинара "Пайка алюминиевых конструкций". М.: МДНТП, 1990.
10. Суслов А.А. Безфлюсовая пайка узлов из алюминиевых сплавов в вакууме // Сварочное производство. 1994. № 10. С. 25–26.
11. Перевезенцев Б.Н., Соколова Н.М., Теплицына Г.А. Пайка в низком вакууме // Сварочное производство. 1996. № 6. С. 2–4.
12. Березников Ю.И. Современные процессы пайки алюминиевых конструкций. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1978. 63 с.
13. Горбатский Ю.В. Разработка технологии пайки в среде аргона крупногабаритных алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников для воздухоразделительных установок. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001.
14. Горбатский Ю.В., Лантушенко Л.С. Разработка способа пайки алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников в среде аргона // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1999. № 9. С. 6–10.
15. Лантушенко Л.С. Разработка технологии подготовки поверхности крупногабаритных алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников к пайке в среде аргона. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2002.
16. Степанов В.В. Разработка припоеv системы Al–Si–Ge для повышения прочности паяных конструкций из алюминиевых сплавов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2000.
17. Шашкин О.В. Вакуумная конвейерная пайка титановых и титано-алюминиевых конструкций припоями на основе алюминия. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2006.
18. Хорунов Ю.Ф., Кужель А.В., Супереко О.Д. Вакуумная пайка пластинчатых теплообменников для рабочего газа с температурой до 700 °C // Автоматическая сварка. 1987. № 5. С. 62–63.
19. Кужель А.В. Разработка технологии вакуумной пайки компактных пластинчатых теплообменников из нержавеющей стали. Автореф. дис. ... канд. техн. наук., Киев, 1984.
20. Музалевский Н.Г. Исследование и разработка технологического процесса пайки стальных пластинчатых теплообменников летательных аппаратов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1982.
21. Новосадов В.С. Применение многослойного композиционного припоя для высокотемпературной пайки теплообменников // Сварочное производство. 2013. № 9. С. 24–29.
22. Беляев В.Н. Надежность паяных соединений труб с трубными решетками, выполненных высокотемпературной пайкой // Автоматическая сварка. 1983. № 10. С. 59–61.
23. Радзиевский В.Н., Ткаченко Г.Г. Высокотемпературная пайка труб с трубными решетками по широкому паяльному зазору // Сварочное производство. 1996. № 8. С. 35–37.
24. Конопелько Ф.Л. Контактно-реактивная пайка трубчатых теплообменников // Матер. сем. "Пайка алюминиевых конструкций". М.: МДНТП, 1990.
25. Радзиевский В.Н. Особенности высокотемпературной пайки в вакууме стальных трубчатых охладителей со спиральным проволочным оребрением // Сб. докл. конф. "Пайка–2005". Тольятти, 2005.

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Строгинский пер., 4

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;

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

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

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

Сдано в набор 12.02.14 г. Подписано в печать 27.03.14 г. Формат 60×88 1/8.

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

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

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