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

7 2012 (144)

СОДЕРЖАНИЕ

Ресурс машин и конструкций

Касьянов П.А. Исследование напряженного состояния в контактах опорно-поворотных устройств драглайнов . . . 3

Экономика и организация сборочного производства

Магдиев Р.Р. Расчет критериев эффективности групповых сборочных процессов в многономенклатурном производстве . . . 8

Технологичность конструкции

Григоров И.В., Маликов А.А., Ямников А.С. Технологический размерный анализ рычажного механизма . . . 11

Современные технологии сборки

Демин А.А., Титов И.А., Шанулин Е.В. Повышение качества сборки соединений с натягом при увеличенном допуске на изготовление деталей . . . 18

Королев А.В., Болкунов В.В., Мирошкин А.Г. Технология сборки радиально-упорных шариковых подшипников с охлаждением внутреннего кольца . . . 21

Павлин В.Н., Голубев С.В., Новинский Э.Г., Головко В.Ф. Опыт изготовления барабанов отработавших сборок для перегрузочного комплекса 4-го энергоблока Белоярской АЭС . . . 23

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка без припоя . . . 26

Семйон Я., Янош Р., Гайдук М., Вархола М., Вагаш М., Балаж В. Модульный принцип проектирования сварочных приспособлений для роботизированных ячеек . . . 35

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Шашурин В.Д., Ветрова Н.А., Мешков С.А. Обеспечение надежности смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах на этапе их сборки . . . 40

В помощь конструктору, технологу

Матросова Ю.Н. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования фасонных фрез . . . 46

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

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

Редакционный совет

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО
БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО
ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН
А.А. СУПОНЯ
В.М. КОРНИЕНКО
ВОЛГОГРАД
В.Г. КАРАБАНЬ
М.Г. КРИСТАЛЬ
В.И. ЛЫСАК
В.М. ТРУХАНОВ
ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ
Б.А. ЯКИМОВИЧ
В.Г. ОСЕТРОВ
КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ
КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ
КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ
КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН
В.И. ШПОРТ
А.М. ШПИЛЕВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ
НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ
ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ
ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ
Г.А. ХАРЛАМОВ
ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ
А.И. СЕРДЮК
А.П. ФОТ
РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.В. НЕПОМИЛУЕВ
А.Н. СЕМЕНОВ
САМАРА
М.А. ЕВДОКИМОВ
Ю.А. ВАШУКОВ
Г.А. КУЛАКОВ
В.А. НИКОЛАЕВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН
Е.В. ШАЛОБАЕВ
ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ
ТУЛА
В.В. ПРЕЙС
ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО

Украина
КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН
В.А. МАТВИЕНКО
ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ
СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА

Беларусь
МИНСК
В.Л. БАСИНЮК
М.Л. ХЕЙФЕЦ
ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2012

THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

7 2012 (144)

CONTENTS

Service life of machinery and constructions

Kasiyanov P.A. Research of stress state on contacts support-turning equipments draglines . . . 3

Economy and the organization of assembly

Magdiev R.R. Calculation of the group assembly processes criteria in the multiproduct production . . . 8

Manufacturability of a construction

Grigorov I.V., Malikov A.A., Yamnikov A.S. The technological dimensional analysis of the lever mechanism . . . 11

Modern technologies in assembly

Demin A.A., Titov I.A., Shanulin E.V. Improving the quality of assembly joints with interference with an increased tolerance for the manufacture of parts . . . 18

Korolev A.V., Bolkunov V.V., Miroshkin A.G. Assembly technology radial contact ball bearings with cooling inner rim . . . 21

Pavlin V.N., Golubev S.V., Novinskiy E.G., Golovko V.F. Experience of manufacturing spent FA drums for refueling complex at the 4th Beloyarskaya NPP power unit . . . 24

Assembly welding works. Solder

Karabanov V.V., Bohorov I.O. The soldering without solder . . . 26

Semjon J., Janosh R., Gajduk M., Varhola M., Vagash M., Balazh V. The design of welding fixtures for robotized cell at based modular principle . . . 35

Quality assurance. Testing. Monitoring

Shashurin V.D., Vetrova N.A., Meshkov S.A. Reliability support of radio signals mixer based-on resonant tunneling diodes at the stage of their assembly . . . 40

Industrial and design engineer's aid

Matrosova Y.N. Software for automated design of shaped cutters . . . 46

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
V.M. KORNIENKO
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
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. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
RYBINSK
V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
G.A. KULAKOV
V.A. NIKOLAEV
ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
TULA
V.V. PREYS
TOLIATI
A.I. RYZHKOV
KHABAROVSK
V.A. LASHKO

Ukraine
KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

Belarus
MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Executive editors of current issue:
Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2012

УДК 621.879.323

П.А. Касьянов, *д-р техн. наук*
(Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург)
E-mail: gmf.gmk@ursmu.ru

Исследование напряженного состояния в контактах опорно-поворотных устройств драглайнов

Приведены результаты исследований напряженного состояния поверхностного слоя контактов "каток–рельс". Показан метод выбора параметров сфероконического катка.

Are given results of research stress state surface layer on contacts "roller–rail". Work out method choice of parameters "sphere–conic" roller.

Ключевые слова: драглайн, контактное напряжение, опорно-поворотное устройство.

Keywords: dragline, contact stresses, support-turning equipments.

Эффективность драглайнов может быть повышена при увеличении межремонтного периода с исключением необходимости замены опорно-поворотных узлов (ОПУ) или их базовых деталей. Разработка методов расчета с возможностью оценки вариантов конструктивных схем, а также совершенствование технологии изготовления опор качения при наименьшей неравномерности распределения нагрузки между катками с минимальным проскальзыванием в контактах позволит вдвое увеличить долговечность опор. Вакуумирование при разливке стали для поковок основных деталей повышает контактную выносливость на 15 %.

Рассмотрим результаты исследований напряженного состояния поверхностных слоев в контакте бомбинированных (сфероконических) катков ОПУ драглайнов.

При бомбинированных катках, применяемых в ОПУ мощных драглайнов, а также при выпуклой головке рельса схема контакта характеризуется эллиптической площадкой контакта. Основными параметрами такой площадки являются большая и малая полуоси эллипса и их отношение. Пространственная эпюра давлений на площадке контакта – эллипсоид:

$$a^{-2}x^2 + b^{-2}y^2 + c^{-2}\varepsilon^2 = 1, \qquad (1)$$

где a и b – большая и малая полуоси эллипса площадки контакта; ε и c – ордината давления и ее максимальное значение.

Давление в произвольной точке площадки контакта

$$p = p_0\, c^{-1}\, \varepsilon,$$

где

$$c^{-1}\,\varepsilon = [1 - (a^{-2}x^2 + b^{-2}y^2)]^{0,5}; \qquad (2)$$

$$p_0 = 1{,}5\,(\pi\, a b)^{-1}\, P, \qquad (3)$$

P – нормальная нагрузка, сжимающая тела качения.

Напряженное состояние в точках, лежащих на оси z, характеризуется следующими зависимостями [5] главных напряжений от глубины залегания:

$$\sigma_x = -p_0\frac{b}{a}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\left[1-\sqrt{\frac{\left(\frac{b^2}{a^2}+\frac{z^2}{a^2}\right)}{\left(1+\frac{z^2}{a^2}\right)}}-2\mu\left(1-\frac{a^2}{b^2}\sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2}+\frac{z^2}{a^2}}{1+\frac{z^2}{a^2}}}+\frac{z}{a}\left(\frac{a^2}{b^2}F-E\right)\right)\right];$$

$$\sigma_y = -p_0\frac{b}{a}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\left\{-1+\left[1+\left(\frac{\frac{z^2}{a^2}\left(\frac{2a^2}{b^2}-1\right)}{\sqrt{1+\frac{z^2}{a^2}}\sqrt{\frac{b^2}{a^2}+\frac{z^2}{a^2}}}\right)-2\left(\frac{a^2}{b^2}F-E\right)\right]+2\mu\left(1-\sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2}+\frac{z^2}{a^2}}{1+\frac{z^2}{a^2}}}+\frac{z(F-E)}{a}\right)\right\}; \qquad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{-p_0}{\sqrt{1+\frac{z^2}{a^2}}\sqrt{1+\frac{z^2}{b^2}}},$$

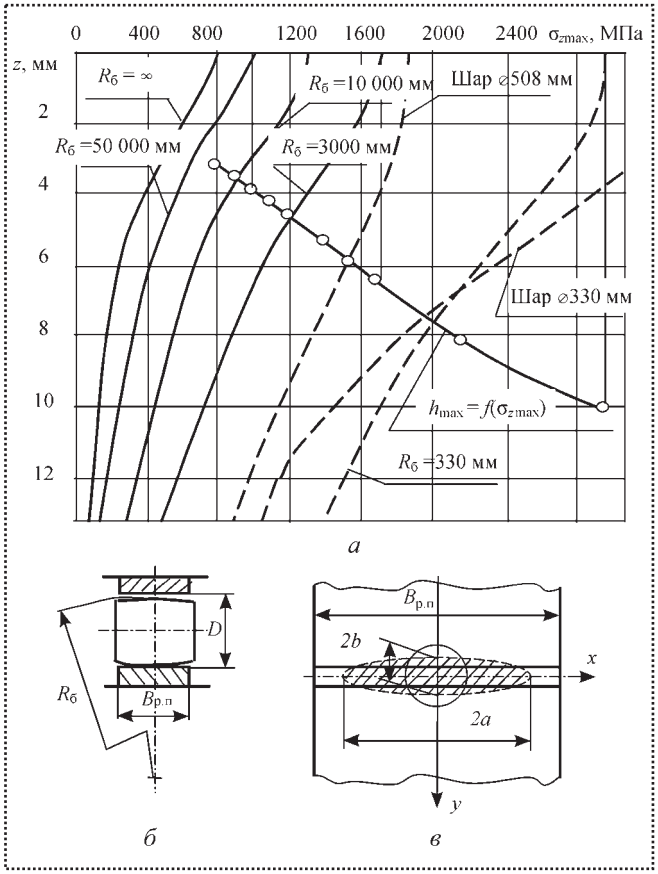


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений σ_z по оси симметрии при различных значениях $R_б$:
а – график зависимостей; *б* – схема контакта; *в* – площадка контакта; h_{max} – глубина расположения точек с наибольшей интенсивностью напряжений; *D* – максимальный диаметр катка; $B_{р.п}$ – ширина рабочей поверхности рельсового круга

где μ – коэффициент Пуассона; *F* и *E* – эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода.

На рисунке 1 показаны максимальные напряжения на поверхности рельса в площадке контакта по оси симметрии $\sigma_{z\,max}$ и распределения нормальных напряжений σ_z для бомбинированного цилиндрического катка ЭШ-40.85 при различных радиусах бомбины $R_б$. В существующих конструкциях катков принято $R_б$ = 3000 и 10 000 мм. При этом бóльшая ось эллипса площадки контакта составляет 31 и 54 % от ширины рельса соответственно. Максимальные напряжения $\sigma_{z\,max}$ при наибольшей из длительно действующих нагрузок в 2,18 и 1,66 раза больше, чем при линейном контакте.

Нормальные напряжения наибольшие при z = 0, но с удалением расчетной точки от поверхности быстро уменьшаются. Наибольшие значения интенсивности σ_i и глубина точки, соответствующей этому значению, увеличиваются с уменьшением радиуса бомбины $R_б$. На рис. 1 эта зависимость показана прямой $z_i = 0{,}0035\sigma_{max}$, где $\sigma_{i\,max}$ – в МПа, z_i – в мм, точки соответствуют: *1* – $R_б$ = 3000 мм, *2* – $R_б$ = 10 000 мм и *3* – для линейного контакта при отсутствии бомбины.

Глубина расположения точки с наибольшей интенсивностью напряжений при $R_б$ = 3000 мм в 2,25 раза больше, чем при линейном контакте "каток–рельс", и составляет 3,31 мм.

Этим можно объяснить меньшую интенсивность развития шелушения поверхности рельса на драглайне ЭШ-40.85 по сравнению с ЭШ-25.100, имеющем в ОПУ небомбинированные конические катки.

При анализе напряженного состояния контакта необходимо определять геометрию контакта: полуоси эллипса площадки контакта, давление в центре, сближение тел и др. Это нужно для сопоставления ширины рельса и наибольшей оси эллипса при оценке влияния угловых деформаций рельсовых кругов на напряжение в контакте. В случае, если геометрические соотношения укладываются в пределы табличных значений коэффициентов, расчет выполняется просто [6, 7].

Для наибольших радиусов бомбины $R_б$ > 20 000 мм необходимо с использованием таблиц эллиптических интегралов решить трансцендентное уравнение [5]:

$$A / B = (1 - e^2) J_x (F - J_x)^{-1}, \qquad (5)$$

где *A* и *B* – параметры уравнения расстояний между точками контактирующих тел;

e – относительный эксцентриситет контурного эллипса площадки контакта;

J_x – интегральная функция, $J_x = e^{-2}(F - E)$.

Задаваясь различными значениями *e* и используя таблицы полных эллиптических интегралов, для решения строим график зависимости $A / B = f(e)$ в области интересуемых значений эксцентриситета *e* (рис. 2).

Параметры уравнения расстояний между точками контактирующих тел с одинаковыми значениями координат *x*, *y* [5] определим по формулам:

$$A = \frac{(k_{11} + k_{12}) + (k_{21} + k_{22}) + \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22})\cos 2\omega}}{4};$$
$$B = \frac{(k_{11} + k_{12}) + (k_{21} + k_{22}) - \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22})\cos 2\omega}}{4}, \qquad (6)$$

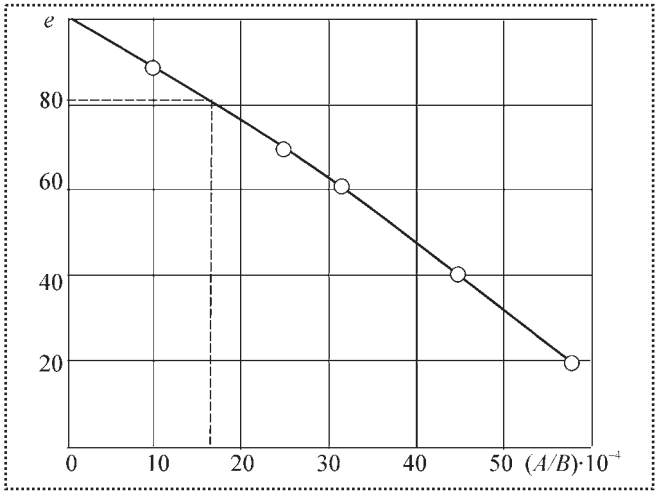


Рис. 2. Зависимость эксцентриситета *e* контурного эллипса от кривизны бомбинированного катка

где k_{11}, k_{12} – кривизны первого тела в его главных сечениях с наибольшим и с наименьшим радиусами кривизны;

k_{21}, k_{22} – кривизны второго тела в его главных сечениях с наибольшим и с наименьшим радиусами кривизны;

ω – угол между плоскостями кривизны $k_{11}k_{21}$.

Ось *x* должна быть расположена по большой полуоси эллипса, тогда при вычислениях по формуле (6) параметром *A* следует называть меньшую из полученных двух величин.

Для контакта плоского рельса (рис. 1, *а*) $k_{21} = k_{22} = 0$, поэтому

$$A = \frac{(k_{11} + k_{12}) + (k_{11} - k_{12})}{4} = \frac{k_{11}}{2}; \quad B = \frac{(k_{11} + k_{12}) - (k_{11} - k_{12})}{4} = \frac{k_{12}}{2}, \tag{7}$$

где $k_{11} = R_б^{-1}$; $k_{12} = 2D^{-1}$.

Для контакта цилиндрического катка со скругленной головкой рельса

$$A = 0{,}5 / R_1; \quad B = 0{,}5 R_2, \tag{8}$$

где R_1 – радиус головки рельса; R_2 – радиус катка.

При этом $R_1 > R_2$, $k_{11} = 0$; $k_{12} = R_1^{-1}$; $k_{21} = 0$; $k_{22} = R_2^{-1}$.

По отношению *A*/*B* из графика на рис. 2 находим значение эксцентриситета *e*, эллиптические интегралы *F*(*e*), *E*(*e*) и параметры площадки контакта [5].

Большая полуось контурного эллипса

$$a = n_a (1{,}5\,\eta\, p\, \Sigma k)^{1/3}, \tag{9}$$

где $n_a = (2\pi^{-1}(1 + B A^{-1}) J_x)^{1/3}$; $\Sigma k = k_{11} + k_{12}$; $\eta = 2E^{-1}(1 - \mu^2)$.

Малая полуось контурного эллипса

$$b = n_b (1{,}5\,\eta\, P\, \Sigma k)^{1/3}, \tag{10}$$

где $n_b = \{2\pi^{-1}(1 + AB^{-1})[F(e) - J_x](1 - e^2)^{0{,}5}\}^{1/3}$.

Наибольшее давление в контакте

$$p_0 = n_p\, \pi^{-1} (1{,}5\,\eta^{-2} p (\Sigma k)^2)^{1/3}, \tag{11}$$

где $n_p = n_a^{-1}\, n_b^{-1}$,

и сближение за счет контактных деформаций

$$\delta = 0{,}5 n_\sigma (2{,}25\,\eta^2\, P^2\, \Sigma k)^{1/3}, \tag{12}$$

где $n_\sigma = F(e)[4\pi^{-2}(1 + BA^{-1}) J_x^{-1}]^{1/3}$.

С использованием изложенной методики рассчитаны параметры площадок контакта и максимальные контактные напряжения при различных схемах контакта: при точечном первоначальном контакте (рис. 3) для шара и для бомбинированных катков при линейном контакте. Напряжения определены по наибольшей длительно действующей нагрузке в ОПУ ЭШ-40.85, радиусы бомбины изменялись от 0,33 до 100 м. Глубина расположения точки с наибольшей интенсивностью напряжений определена из соотношения $h_{max} = b(2)^{0{,}5}$ [6].

При изменении радиуса бомбины в этих пределах для цилиндрического катка диаметром 330 мм максимальное напряжение в контакте уменьшилось в 3,489 раза. Однако радиус бомбины в этом конкретном слу-

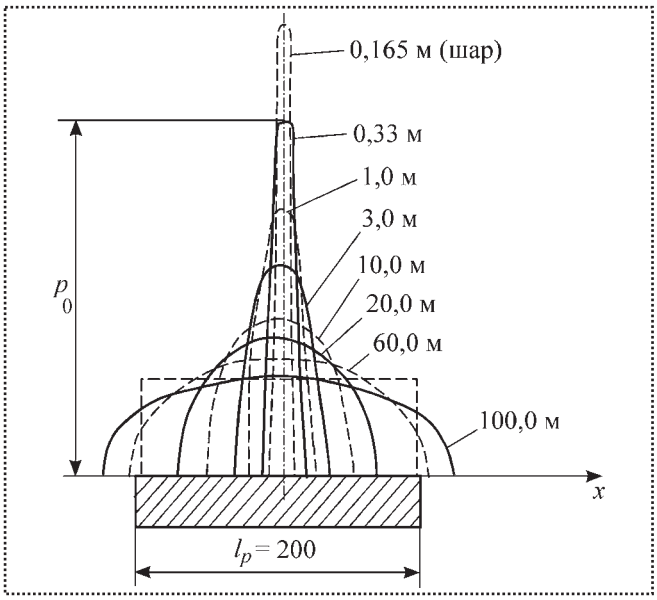


Рис. 3. Изменение эпюры давлений с увеличением радиуса бомбины от 0,165 м до 100 м

чае не может быть больше 60 м, если предельную длину большой оси эллипса ограничить шириной рельса. Необходимость ограничения радиуса бомбины по максимуму связана также с относительным поворотом верхнего и нижнего рельсов, поскольку площадка контакта при этом перемещается по радиусу рельсового круга и при определенном угле перекоса может выйти за край рельса. Учитывая ширину рельса, смещение площадки контакта $\theta R_б$ и используя выражение (9), получаем формулу для определения выхода площадки контакта за кромку рельса:

$$\Delta = \theta R_б - 0{,}5B + (6\pi^{-1} E^{-1} (1-\mu^2) J_x R_б P)^{1/3}, \quad (13)$$

где θ – половина угла относительного перекоса рельсов;

$R_б$ – радиус бомбины катка;

B – ширина рельса;

J_x – интегральная функция;

P – расчетная нагрузка на каток.

При коэффициенте Пуассона μ = 0,3 и модуле $E = 2{,}15 \cdot 10^4$ формула (13) может быть записана в виде

$$\Delta = \theta R_б - 0{,}5B + 0{,}043 (J_x R_б P)^{1/3}. \quad (14)$$

Зоны размещения площадки контакта на рабочей ширине рельса показаны на рис. 4. Из зависимостей (13), (14) и соответствующих им графиков видно, что длина полуоси эллипса при заданной кривизне (J_x = const) зависит от нагрузки P. Зона полного контакта, по всей площадке эллипса, размещается слева от точки A пересечения кривой $a = f(R_б)$, при $R_б < R_{бз}$. Справа расположена зона усеченных эллипсов контакта, причем величина выхода площадки контакта за кромку рельса Δ увеличивается с возрастанием $R_б$.

Как показали исследования [2], угловые деформации кольцевой балки ЭШ-40.85 на различных участках существенно отличаются: в зоне действия наибольших нагрузок на катки, под стрелой, они меньше (линия *3*), чем в плоскостях под углом 45...60° к продольной оси (линия *4*), и имеют максимальное значение на поперечной оси платформы. В таком случае для выбора рационального радиуса бомбины катков необходимо построение, по крайней мере, двух графиков $a = f(R_б)$: для наибольшей длительно действующей нагрузки и для нагрузки, действующей в зоне максимальных угловых деформаций (кривая *2*).

Выбор радиуса бомбины правильнее производить по кривой наибольших нагрузок *1*, а по кривой *2* проверить уровень давлений на кромке рельса. В связи с этим возникает необходимость разработки методики расчета контактных напряжений при усеченном эллипсоиде давлений. Этот вопрос в отечественных работах не исследован.

Рациональным радиусом бомбины для катков ЭШ-40.85 в соответствии с линией *4* будет $R_б$ = 20 000 мм. В зоне максимальных нагрузок (кривая *1*) площадка контакта не выйдет за кромку рельса: запас Δ = 10 мм. В зоне наибольших угловых деформаций (линия *2*) выход площадки контакта Δ = 12 мм. Наибольшее контактное напряжение при этом 1102 МПа – по сравнению с катками $R_б$ = 3000 мм снижается на 35 %, а в сравнении с $R_б$ = 10 000 мм – на 14 %.

Максимальное контактное напряжение $\sigma_{z\max}$ формально может быть использовано в качестве критерия для оценки прочности, поскольку при воздействии на зону контакта только нормальных нагрузок все напряжения линейно взаимосвязаны [6]. Однако максимальные нормальные напряжения $\sigma_{z\max}$ (так же как и $\tau_{\max}$) не могут быть использованы в качестве критериев при учете трения в зоне контакта.

Поскольку для идентичных материалов при отсутствии трения касательные усилия отсутствуют, применимо решение Герца [1]. Вывод справедлив, если отсутствуют конструктивные условия появления упругого или геометрического проскальзывания. Наши исследования [3] показали, что проскальзывание имеет место во всех типах ОПУ драглайнов, и при больших размерах тел качения на большей части площадок контакта будет полное проскальзывание. Поперечное реверсивное проскальзывание [3] при-

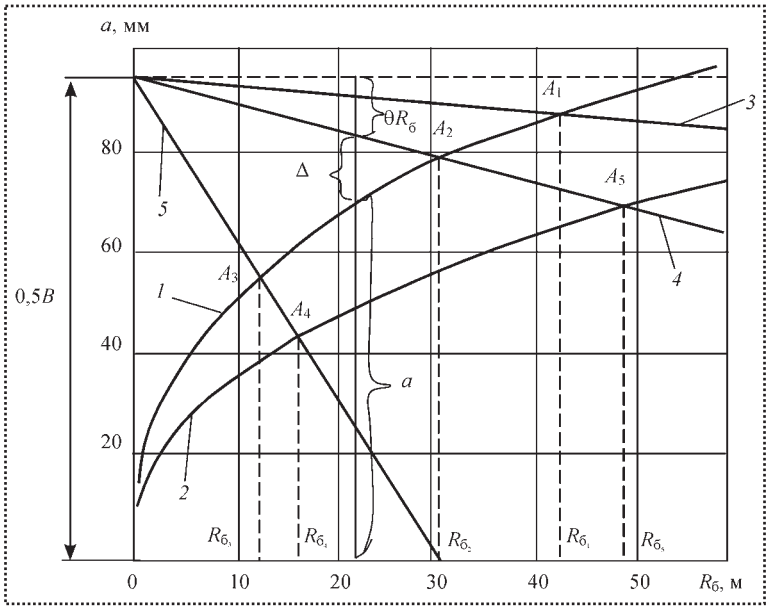


Рис. 4. Зависимости большой полуоси *A* площадки контакта от радиуса бомбины катка:
1 – при P = 519,06 кН; *2* – при P = 211,01 кН; *3–5* – смещения площадки контакта при перекосах θ = $1{,}5 \cdot 10^{-4}$; θ = $5{,}3 \cdot 10^{-4}$; θ = $31 \cdot 10^{-4}$ рад

Параметры контакта и напряжения в ОПУ

Деталь		Параметр			
		a, мм	b, мм	$\sigma_{z\,max}$, МПа	h_{max}, мм
Шар диаметром 508 мм		12,935	12,936	187,0	9,146
Бомбина радиусом $R_б$,м	0,33	11,385	7,199	298,7	10,181
	1,0	19,249	5,773	220,1	8,164
	3,0	29,896	4,727	173,0	6,685
	8,0	45,875	3,838	138,9	5,428
	10,0	51,339	3,630	131,3	5,134
	20,0	69,750	3,120	112,4	4,412
	50,0	93,778	2,782	99,9	3,934
	60,0	100,558	2,594	90,5	3,668
	100,0	121,587	2,380	85,6	3,366

сутствует во всех опорах с пересекающимися осями вращения контактирующих тел. Поэтому приведенные в таблице результаты расчетов нужно рассматривать как часть комплексной оценки параметров ОПУ. Для окончательного выбора конструкции необходимо выполнить расчеты основных деталей на выносливость с учетом неравномерности распределения нагрузки и трения в контактах.

Библиографический список

1. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
2. **Касьянов П.А.** Определение угловых деформаций в рельсовых кругах драглайнов при проектировании // Изв. вузов. Горный журнал. 1991. № 6. С. 73–76.
3. **Касьянов П.А.** Проскальзывание в многокатковых опорно-поворотных устройствах драглайнов // Изв. вузов. Горный журнал. 1990. № 6. С. 86–90.
4. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров: пер. с англ. / Под ред. И.Г. Арамановича. 2-е изд. М.: Наука, 1970. 720 с.
5. **Макушин В.М.** Упругие перемещения и напряженное состояние в местах силового контакта деталей. В кн.: Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С.Д. Пономарева. М.: Машгиз, 1958. Т. 2. С. 386–486.
6. **Орлов А.В., Черменский О.Н., Нестеров В.М.** Испытания конструкционных материалов на контактную усталость. М.: Машиностроение, 1980. 110 с.
7. **Р50-54-30–87.** Расчеты и испытания на прочность. Методы испытания на контактную усталость. URL: http: // www.standarts.ru.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

СПРАВОЧНИК КУЗНЕЦА

А.С. Матвеев, В.А. Кочетков. Под редакцией В.Ф. Безъязычного

Объем 360 с.
Формат 70х100 1/16
Переплет
ISBN 978-5-94275-579-9
Цена 440 р.

Представлены сведения о материалах, применяемых в авиационном двигателестроении, краткие данные о физической сущности пластической деформации, основном оборудовании цехов кузнечно-штамповочного производства, используемой оснастке, нагревательных устройствах и режимах ковки и штамповки, а также контроля температур при нагреве металла. Показана роль обработки материалов давлением в создании нанокристаллической структуры материалов.

Приведены сведения об основных кузнечных и штамповочных операциях и производственных методах контроля качества поковок и штамповок. Рассмотрены вопросы термической обработки поковок и штамповок.

Дано понятие «специальный процесс», изложены требования, предъявляемые к производственному персоналу и используемому оборудованию.

Справочник рекомендуется для подготовки рабочих на предприятиях, а также в качестве учебного пособия для обучения специалистов среднего профессионального образования.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский 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 621.923.47:621.3.07

Р.Р. Магдиев, *канд. техн. наук, (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики "НИУ ИТМО")*
E-mail: rmagdy@mail.ru

Расчет критериев эффективности групповых сборочных процессов в многономенклатурном производстве

Приведена методика выбора технологическх решений и их оптимизация на основе комплексных критериев эффективности. Особенностью процесса расчета критериев является целенаправленное изменение производственной ситуации с использованием специальных моделей, содержащих частные критерии. Методика опробирована на предприятии "Балтсистем".

The method of selection technological solutions and their optimization based on the combined effective criterion is given. The criterion calculating process peculiarity is purposeful production situation changing using special models, which contained particular criterion. The method is published on the "Baltsystem" enterprise.

Ключевые слова: длительность цикла сборки, объем продукции, затраты, коэффициент загрузки оборудования.

Keywords: assembly cycle duration, volume of production, costs, equipment load factor.

Любой тип производства и особенности его организации предлагают выбор наилучших вариантов решения на всех этапах подготовки и осуществления производственной деятельности. Основой выбора решений являются значения разнообразных многочисленных критериев эффективности, оценивающих основные стороны деятельности сборочного производства. Важное значение приобретают критерии эффективности при разработке различных вариантов сборочных технологических процессов в ходе построения систем управления, реализующих технологические процессы сборки, планы "запуска–выпуска" изделий.

Все многообразие критериев можно классифицировать, во-первых, по степени общности: локальные и глобальные; во-вторых, по способу использования: для целей сборки изделий с минимальными затратами и для целей оперативного управления.

Глобальные критерии определяют максимум общественной полезности и формируются на уровне потребностей рынка, отраслей, предприятий. Эти критерии позволяют разработать оптимальные потребности социально-экономического развития по предприятиям и отраслям, учитывать и поддерживать необходимые пропорции в расходовании ресурсов и регламентировать потребности в выпуске продукции определенных видов.

Глобальные критерии оптимальности являются отправными при выборе критериев согласованности планов по вертикали – от отрасли, предприятия до рабочего места. Они служат основой для выработки принципов управления сборочным производством и планирования. Глобальный и локальный критерии как понятия определяются без четкой и грамотной постановки задачи оптимизации, поскольку один и тот же критерий, например, максимум прибыли, может рассматриваться и как глобальный, с точки зрения предприятия при определении планов по отраслям, и как локальный, с точки зрения рынка.

Критерии планирования позволяют решать задачи оптимизации производственных ресурсов и используются, как правило, при построении моделей линейного или, реже, нелинейного математического программирования. К основным из них можно отнести:

- минимум длительности производственного цикла изготовления сборочных единиц и изделий;
- минимум объемов незавершенного производства;
- минимум приведенных затрат;
- минимум простоев или максимум загрузки оборудования;
- минимум опаздывания изготовления узлов к заданному сроку и времени их подачи на следующую операцию или сборку;
- минимум суммарных затрат на сборку заданного числа изделий;
- максимум прибыли и рентабельности;
- максимум производительности отдельных видов оборудования и производительности всего подразделения и т.д.

Этот далеко не полный перечень критериев эффективности позволяет решать задачи оптимизации планов, определяя:

- объем выпуска и реализации продукции;
- прибыль и рентабельность;
- рост производительности труда;
- степень использования производственных мощностей;

- оборачиваемость оборотных средств;
- себестоимость продукции;
- эффективность капитальных вложений и другие показатели предприятия.

Для целей управления применяют как перечисленные ранее критерии, так и специально разрабатываемые. При оперативном управлении задачи стратегии и тактики решают с учетом фактора времени. При этом время может быть составным элементом критерия сборочных операций изделия, а может присутствовать неявно, например, при построении календарных план-графиков движения сборочных единиц в производстве. Применяемые при разработке технологических систем сборочного производства критерии эффективности носят динамический характер, существенно зависят от типа производства, математического аппарата описания систем, от исполнительного механизма организации сборочного производства и от алгоритмов принятия управленческих решений.

Таким образом, сложное автоматизированное производство, а тем более сборочное производство, требуют разработки новых способов построения сборочных технологических процессов, основанных на специальных динамических критериях эффективности. Широкие возможности для оптимизации использования группы сборочных процессов имеет имитационное моделирование, основанное на эвристических и экспериментальных алгоритмах, которые строятся в основном на базе правил приоритетов выбора решений. Суть такого направления заключается в привлечении математического аппарата логики и накопленного опыта практической деятельности к построению конкретных логико-динамических моделей, учитывающих специфику данного производства и использующих различные критерии эффективности принятия решений.

Методологической основой построения системы оперативного управления формированием и распределением сборочных процессов является рассмотрение управления как целенаправленного изменения производственной ситуации с целью достижения эффективности функционирования сборочной производственной системы.

Процесс оперативного управления можно представить в виде блок-схемы, показанной на рисунке, из которой следует, что важно не только идентифицировать ситуацию, но и оценивать ее путем сравнения с "идеальным" вариантом либо с некоторыми другими возможными ситуациями, в которые сборочное производство перейдет в результате реализации соответствующих решений.

Очевидно, что даже при достаточно простой структуре сборочного участка, включающей до десятка единиц сборочного оборудования и небольшой номенклатуре изделий с различными технологическими маршрутами, число возможных решений велико. Декомпозиция возможных управлений, выделение среди них "перспективных" вариантов развития ситуации позволит перейти от множества $P(x)$ возможных управлений к подмножеству $P_1(x)$ допустимых управлений и по оценке их по выбранному критерию эффективности – к конкретному управляющему воздействию $x^0 \in P_1(x)$. При этом более предпочтителен не одношаговый

Обобщенная блок-схема оперативного управления сборочным производством

просмотр решений, а n-шаговое прогнозирование возможных путей достижения цели от данного i-го момента времени на момент завершения сборки изделий.

При анализе множество S_1 возможных ситуации, а следовательно, возможных управлений в принятом множестве D_1 допустимых ситуаций (допустимых управлений) $D_1 \subset S_1$, следует выделить класс штатных и нештатных производственных ситуаций. Рассмотрим штатные ситуации, допускающие функционирование сборочного участка и предусматривающие диалог с оператором. Для данного класса сборочных производственных ситуаций разрешающие правила формирования элементов множества $P(x)$ могут быть записаны в виде системы логических уравнений на основе разработанных модели функционирования сборочного участка и модели состояний с учетом коммутативности в технологических маршрутах сборки.

Для оценивания сборочных производственных ситуаций разработаны частные критерии, характеризующие основные составляющие производственного процесса:

- состояние технологического оборудования;
- состояние собираемых узлов и изделий с учетом объединения их в партии;
- состояние транспортно-складской системы (робота-манипулятора и складских модулей).

В качестве критериев оценки состояния оборудования предлагается использовать показатели загруженности оборудования по рабочим местам и по сборочному участку в целом в рамках каждой партии узлов и изделий и также при выполнении всей программы выпуска. В отличие от коэффициента загрузки оборудования, который используется в технико-экономическом планировании, предлагаемые показатели рассчитывают при построении модели системы управления в моменты изменения сборочной производственной ситуации. Показатели загруженности оборудования отражают организационные и технологические характеристики производства и служат основой для управления.

Для оценивания состояния узлов и изделий следует определять степень их готовности (степень завершенности сборки) совокупностью показателей, отражающих число выполненных операций в количественном, временном и стоимостном исчислении для изделий η'_{lm}, партии сборочных η_i единиц и программы выпуска G в моменты изменения сборочного производства.

Вычисление значений критериев сборочной производственной ситуации основано на использовании моделей технологических процессов сборки и производственной системы с учетом временных и структурных характеристик сборочного участка или цеха. Так показатели занятости u'_y отдельного сборочного модуля, модулей группы u_i и оборудования участка в целом U, выраженные в двоичных числах, характеризуют только факт наступления событий. Занятость оборудования в данный момент времени описывается показателями оборудования отдельной группы и системы в целом формулами:

$$\xi'_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} u'_y}{n_i}, \qquad (1)$$

$$\xi(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i} u'_y}{\sum_{i=1}^{N} n_i}. \qquad (2)$$

Знаменатель в выражениях (1) и (2) определяет общее число сборочных модулей участка.

Введенные в описание производственной ситуации показатели загруженности оборудования, имеющие иерархическую структуру, характеризуют общее количество технологических операций (переходов), выполненных к данному моменту времени на сборочном модуле, сборочных модулях отдельной группы, на оборудовании участка в целом. Поскольку данные показатели состояния оборудования не отражают степень его использования, так как безотносительны ко времени, то необходимо ввести в рассмотрение временные оценки.

Время загрузки r_{ij} j-го модуля i-й группы выполнением отдельной технологической операции складывается из основного времени $t(r_{ij}) = \sum_{k=1}^{m_{ij}} t(p_{ijk})$ выполнения m_{ij} технологических переходов и времени обслуживания, включающего время на установку $t(x_{ij}^N)$ и снятие $t(x_{ij}^k)$ сборочной единицы, а также на установку сборочного инструмента для технологических переходов как сумму времен $\sum_{k=1}^{m_{ij}} t(x_{ijk}^U)$. Следовательно, время загрузки сборочного модуля выполнением одной операции над сборочной единицей вычисляется по формуле:

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{m_{ij}} t(p_{ijk}) + t(x_{ij}^N) + t(x_{ij}^k) + \sum_{k=1}^{m_{ij}} t(x_{ijk}^U). \qquad (3)$$

В свою очередь, время установки $t(x_{ij}^N)$ аналогично времени снятия $t(x_{ij}^k)$ сборочной единицы и складывается из времени движения транспортного робота в реальном физическом пространстве из данного фиксированного положения до места нахождения указанной сборочной единицы, определяемого показателем L_{dlm} времени выбора сборочной единицы, времени движения транспортного робота со сборочной единицей до j-го модуля и времени выполнения манипуляции установки. Для данного сборочного участка характерно, что перемещает сборочные единицы транспортный робот в спутниках, поэтому время выбора сборочной единицы со склада и время выполнения других манипуляций одинаковы для сборочных единиц всех видов.

Время перемещения транспортного робота в физическом пространстве вычисляют как частное от деления пройденного пути на скорость перемещения транспортного робота v_r. Длину пути определяют вычислительным модулем разности между элементами массива $L = \{\ell_i\}$ расстояний, заданных, например, от исходного начального положения транспортного робота возможных фиксированных положений N_r. Введя в рассмотрение множество $X_{\nu\mu} = \{x^{\nu\mu}\}$ переходов, определяемых как перемещения транспортного робота в физическом пространстве из начального положения ν в конечное положение μ движения ($\nu = 1, ..., N_r$, $\mu = 1, ..., N_r$), можно записать выражением:

$$t(x^{\nu\mu}) = \mathrm{mod}\,(\ell_\nu - \ell_\mu) / v_r. \qquad (4)$$

В случае, когда пределы варьирования значений $t(x^{\nu\mu})$ незначительны и сами величины $t(x^{\nu\mu})$ много меньше времен выполнения основных технологических операций, можно допустить, что $t(x^{\nu\mu})$ есть величина постоянная. Тогда 2-е и 3-е слагаемые в выражении для подсчета τ_{ij} тоже есть некоторые статически определенные константы (среднее арифметическое), т.е.

$$t(x_{ij}^N) = t(x_{ij}^N); \quad t(x_{ij}^k) = t(x_{ij}^k) \qquad (5)$$

для сборочных единиц всех видов.

Предложенные динамические критерии анализа и оценки производственной ситуации характеризуют изменение состояния предметов и средств труда в процессе сборочного производства и отражают загруженность оборудования для отдельных его единиц, групп и сборочной производственной системы в целом, а также степень готовности изделия, партии изделий и всей программы выпуска в моменты изменения производственной ситуации. Выбранные критерии пригодны для выработки управляющих воздействий в системе управления, так как построены с учетом фактора времени.

Библиографический список

1. **Магдиев Р.Р.** Алгоритм расчета параметров групповых сборочных процессов в многономенклатурном производстве // Металлообработка. 2010. № 6. С. 14–17.

2. **Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В.** Модели и методы управления портфелями проектов. М.: ПМСОФТ, 2005. 206 с.

3. **Миненко С.Н.** Экономико-математическое моделирование производственных систем. М.: МГИУ, 2008. 140 с.

4. **Миротин Л.Б. и др.** Эффективность логистического управления / Под ред. Л.Б. Миротина. М.: Экзамен, 2004. 448 с.

УДК 621.7.57

И.В. Григоров, *инженер,* **А.А. Маликов, А.С. Ямников,** *д-ра техн. наук*
(Тульский государственный университет)
E-mail: andrej-malikov@yandex.ru

Технологический размерный анализ рычажного механизма

Показан подход к технологическому решению сложной многозвенной размерной цепи рычажных механизмов путем имитации в станочной позиции условий работы механизма в конструкции изделия. Показано, что данный прием упрощает технологию пригоночных работ и создает предпосылки для замены ручной пригонки механизированной.

The approach to the technological decision of a difficult multi-tier dimensional chain of lever mechanisms by imitation in machining position of working conditions of the mechanism in a product design. It is shown that the given reception simplifies technology of fitting works and creates preconditions for replacement of manual adjustment mechanized.

Ключевые слова: механизированная пригонка, размерная цепь, рычажный механизм.

Keywords: the mechanized adjustment, the dimensional chain, the lever mechanism.

Качество машин, а следовательно, их конкурентоспособность значительно зависят от качества сборки. Качество машин характеризуется системой показателей и регламентируется системой стандартов (ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ 23660–79, ГОСТ 14.203–83, РД 50-635–87). Одним из важнейших показателей качества, обеспечение которого зависит от технологии изготовления машины, является точность ее изготовления. На соответствие этого показателя служебному назначению машины следует обратить внимание в первую очередь.

Сборочные процессы имеют большое значение в работе машиностроительного предприятия. Трудоемкость узловой и общей сборок составляет в среднем около 30 % всей трудоемкости изготовления машин. В массовом и крупносерийном производствах эта доля меньше, а в индивидуальном и мелкосерийном, где выполняется большой объем пригоночных работ, трудоемкость сборки достигает нередко 45...50 %.

За последние годы относительная трудоемкость сборочных процессов неуклонно растет в связи с тем, что способы получения заготовок и механической обработки совершенствуются более быстрыми темпами. Относительно высокая себестоимость сборочных работ обусловлена преобладанием на сборке ручного труда и использованием рабочей силы высокой квалификации.

При сборке изделий (узлов), имеющих несколько выходных характеристик, применяют пригоночные работы, выполняемые слесарями-сборщиками высокой квалификации. Сборочные операции с ручными пригоночными работами трудоемки, так как требуемая точность выходных характеристик достигается в процессе многократных последовательных пробных съемов компенсационного слоя. После съема каждого пробного слоя производят сборку узла для промера контрольных размеров. Промежуточные сборки–разборки узла являются основной причиной длительного выполнения сборочной операции. Пригоняемые детали имеют повышенную твердость (46...48 HRC). Обработка деталей повышенной твердости напильником требует больших физических усилий от слесаря. Кроме того, сборочные операции с ручными пригоночными работами невозможно точно пронормировать, так как длительность каждого рабочего приема зависит от субъективных особенностей слесаря-сборщика.

Типичным примером рычажного механизма, при сборке которого применяют пригонку, является конструкция узла рычажного механизма, в который входит шептало с крышкой (рис. 1). Она включает: крышку *1*, шептало *2*, рычаг шептала *3*, рычаг толкателя *4*, защелку *5*. Техническими условиями на сборку и приемку механизма предусматривается нормированный по копоти контакт плоскостей *М* и *Л* шептала и базовой детали–крышки (не менее 50 % от номинальной площади). Одновременно с этим должен быть обеспечен выход выступа *Д* правого плеча шептала относительно плоскости крышки на $A_\Delta = 5{,}5 \pm 0{,}2$ мм.

Определим условия для выполнения изложенных ранее требований. На рис. 2 представлены предельные положения рычага в механизме. Шептало показано в положении, когда малое плечо прижато к поверхности крышки *Л*. В идеально выполненном механизме контактирование будет происходить по всей поверхности при одновременном выдерживании замыкающего размера A_Δ (см. рис. 2, *а*).

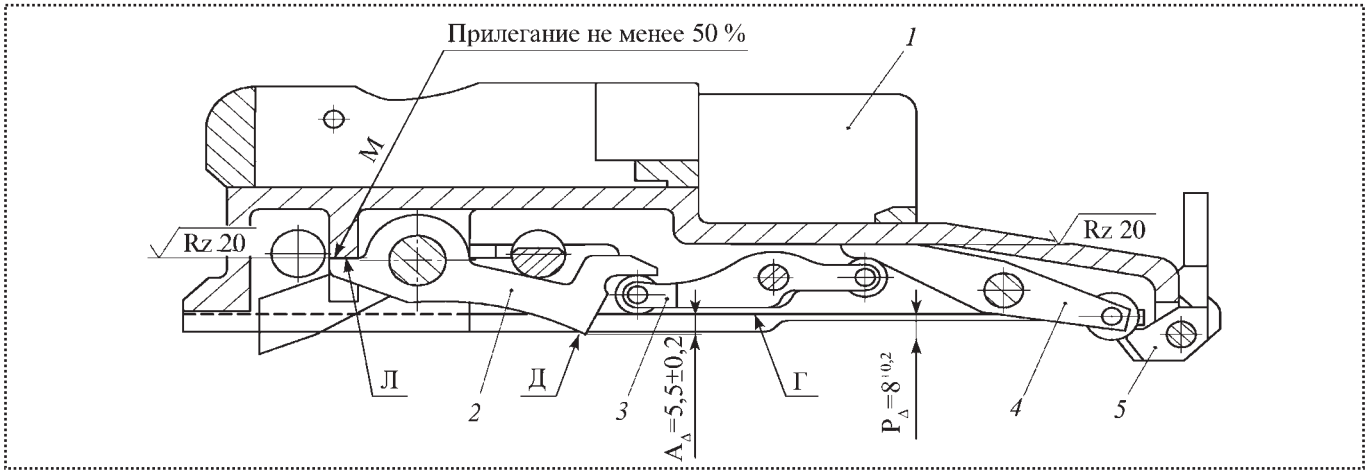


Рис. 1. Схема типового рычажного механизма

В реальном же механизме, изготовленном с отклонениями, пусть даже небольшими, контакт будет осуществляться по линии. На рис. 2, *б* и *в* показаны два возможных крайних положения линий контактирования, обусловленных сочетанием отклонений размеров рычажного механизма. Возникающие в результате неблагоприятного сочетания размеров рычажного механизма раскрытие стыка Δ и погрешность величины выхода плеча шептала ΔA_Δ могут превышать допустимые значения.

Определим предельно допустимые отклонения взаимного расположения поверхностей *Л* и *М*, а также расчетный допуск замыкающего звена $T'A_\Delta$, который необходимо обеспечить перед статическим нагружением размерных звеньев цепи.

Это необходимо для выявления возможности обеспечения предписанных норм точности доработкой поверхности *М* шептала.

Относительная площадь пятна контакта $\Phi_о$, выраженная в процентах по отношению к номинальной площади соприкасающихся поверхностей, равна [3]:

$$\Phi_о = \frac{100\, b_к}{\Delta}, \qquad (1)$$

где $b_к$ – толщина нанесенного слоя копоти, $b_к$ = 0,02 мм;

Δ – величина раскрытия стыка.

Допустимая величина раскрытия стыка при заданной относительной площади пятна контакта $\Phi_о$ = 50 % не должна превышать значения

$$\Delta = \frac{100\, b_к}{\Phi_о} = \frac{100 \cdot 0{,}02}{50} = 0{,}04 \text{ мм}.$$

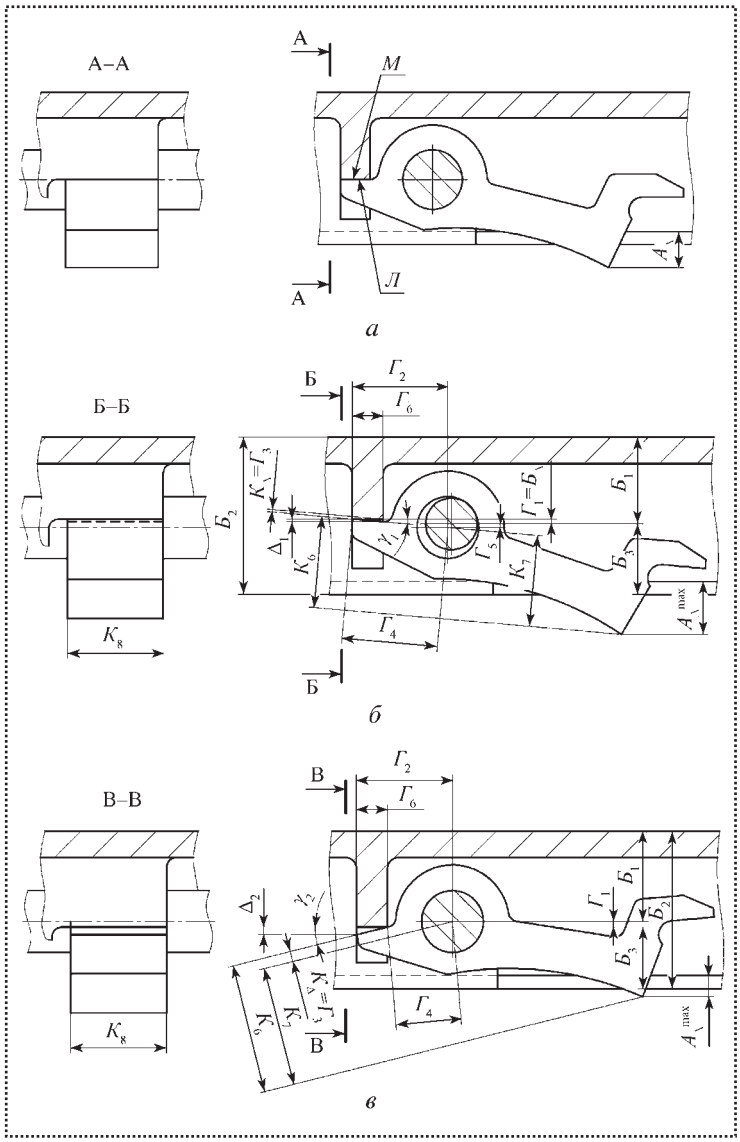


Рис. 2. Схемы предельных положений шептала

Раскрытие стыка определяется действительными значениями размеров $Г_1$ и $Г_3$, а также смещением отверстия шептала относительно пальца в пределах имеющегося зазора.

Отклонения размеров $Г_1$ и $Г_3$ приводят к раскрытию поверхностей *Л* и *М* на угол γ_i.

Возможное отклонение сопрягаемых поверхностей в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, компенсируется при силовом замыкании механизма путем установки поверхности *М* шептала по поверхности *Л* крышки.

При этом возможны два предельных положения контакта. Первое положение (см. рис. 2, *б*) возможно, когда размер $Г_1$ выполнен по своему верхнему отклонению, а размер $Г_3$ – по нижнему; второе положение (см. рис. 2, *в*), – когда размер $Г_1$ выполнен по нижнему, а размер $Г_3$ – по верхнему отклонениям.

Величина раскрытия стыка

$$\Delta = Г_6 \ \mathrm{tg}\ \gamma_i , \qquad (2)$$

где $Г_6$ – длина контактирующей поверхности крышки, $Г_6$ = 6 мм;

γ_i – угол раскрытия стыка.

Углы раскрытия стыка γ_1 и γ_2 первого (рис. 2, *б*) и второго (рис. 2, *в*) положений определяются с помощью уравнений:

$$Г_1 + Г_3 \cos\gamma_1 - Г_4 \sin\gamma_1 + Г_5 = 0 , \qquad (3)$$

$$Г_1 + Г_3 \cos\gamma_2 - Г_4 \sin\gamma_2 = 0 , \qquad (4)$$

которые вследствие малости углов γ_1 и γ_2 можно переписать в виде

$$\gamma_1 = (Г_1 + Г_3 + Г_5) / Г_4 , \qquad (5)$$

$$\gamma_2 = (Г_1 + Г_3) / Г_4 . \qquad (6)$$

Длина плеча, определяющая место контактирования поверхности шептала, может изменяться от 14 мм (размер $Г_4$ на рис. 2, *б*) до 8 мм (размер $Г_4$ на рис. 2, *в*). Величина смещения осей сопряженных цилиндрических поверхностей (диаметр 10 (H_8 / h_9)) $Г_5$ = 0,03 мм. Условия приемки механизма по контакту будут выполнены, если размер $Г_1$, превысит размер $Г_3$ не более чем на 0,063 мм, или размер $Г_3$ превысит размер $Г_1$ не более чем на 0,053 мм, т.е.

$$Г_1^{\max} - Г_3^{\min} \le 0{,}63 \text{ мм}; \quad Г_1^{\min} - Г_3^{\max} \le -0{,}53 \text{ мм}.$$

Принимаем отклонения размеров

$$ТГ_1 = \begin{matrix}+0{,}043\\-0{,}030\end{matrix} \text{ мм}, \quad ТГ_3 = \begin{matrix}+0{,}023\\-0{,}020\end{matrix} \text{ мм}.$$

Звено $Г_1$ является замыкающим в размерной цепи

$$Г_1 = Б_\Delta = Б_2 - Б_1 - Б_3 ,$$

а звено $Г_3$, в свою очередь, – замыкающим звеном в размерной цепи

$$Г_3 = K_\Delta = K_6 - K_7 . \qquad (7)$$

Достижение регламентированного прилегания поверхностей *М* и *Л* при сборке по методу полной взаимозаменяемости возможно лишь в том случае, если размеры $Б_1$, $Б_2$, $Б_3$, K_6 и K_7 будут выполнены с соответствующими допусками:

$$ТБ_1 = 0{,}02 \text{ мм}, \quad ТБ_2 = 0{,}033 \text{ мм},$$
$$ТБ_3 = 0{,}02 \text{ мм}, \quad ТБ_6 = 0{,}023 \text{ мм}, \quad ТК_7 = 0{,}02 \text{ мм}.$$

По результатам расчета можно сделать вывод, что выдерживание столь жестких допусков вызовет значительные затруднения и поэтому можно считать оправданным применение метода пригонки для обеспечения точности сборки узла.

Обычно пригонку производят, удаляя специально оставляемый компенсационный слой припуска с поверхности *М* шептала припиловкой, контролируя качество контакта плоскости *М* по копоти и выступ правого конца шептала по калибрам. Для механизации пригонки шептала целесообразно в станочной позиции создавать условия, имитирующие положение пригоняемого шептала в конструкторском узле, что представлено в виде установочного станочного приспособления (рис. 3).

Шептало при установке с требуемой посадкой на палец *5* прижимается штифтом *1* пружинного зажима к опорной поверхности *С* клина *2*. Ось направляющих втулок *4* и *6*, в которых базируется палец, расположена относительно базовой поверхности *Н* приспособления на расстоянии $П_1$ = 13,5 ± 0,01 мм (размер, заданный чертежом механизма). В этом начальном положении шлифовальный круг подводят до касания с поверхностью *М* шептала (момент касания фиксируется по искре). Далее при возвратно-поступательных движениях стола производят с помощью клино-винтового механизма приспособления подачу на врезание. При этом правое плечо рычага-шептала поворачивается по ходу часовой стрелки до тех пор, пока не произойдет контакт выступа *Д* шептала с базовой поверхностью *Н* приспособления. Это положение соответствует окончанию обработки.

Таким образом, в процессе обработки (шлифования) исключается необходимость контролировать съем металла с поверхности *М*. Требуемое для работы конкретного механизма положение исполнительных поверхностей *М* и *Д* обеспечивается автоматически.

Перед обработкой каждого шептала опорную поверхность *С* клина устанавливают в требуемое положение с помощью измерительно-настроечного приспособления (рис. 4). С помощью этого приспособле-

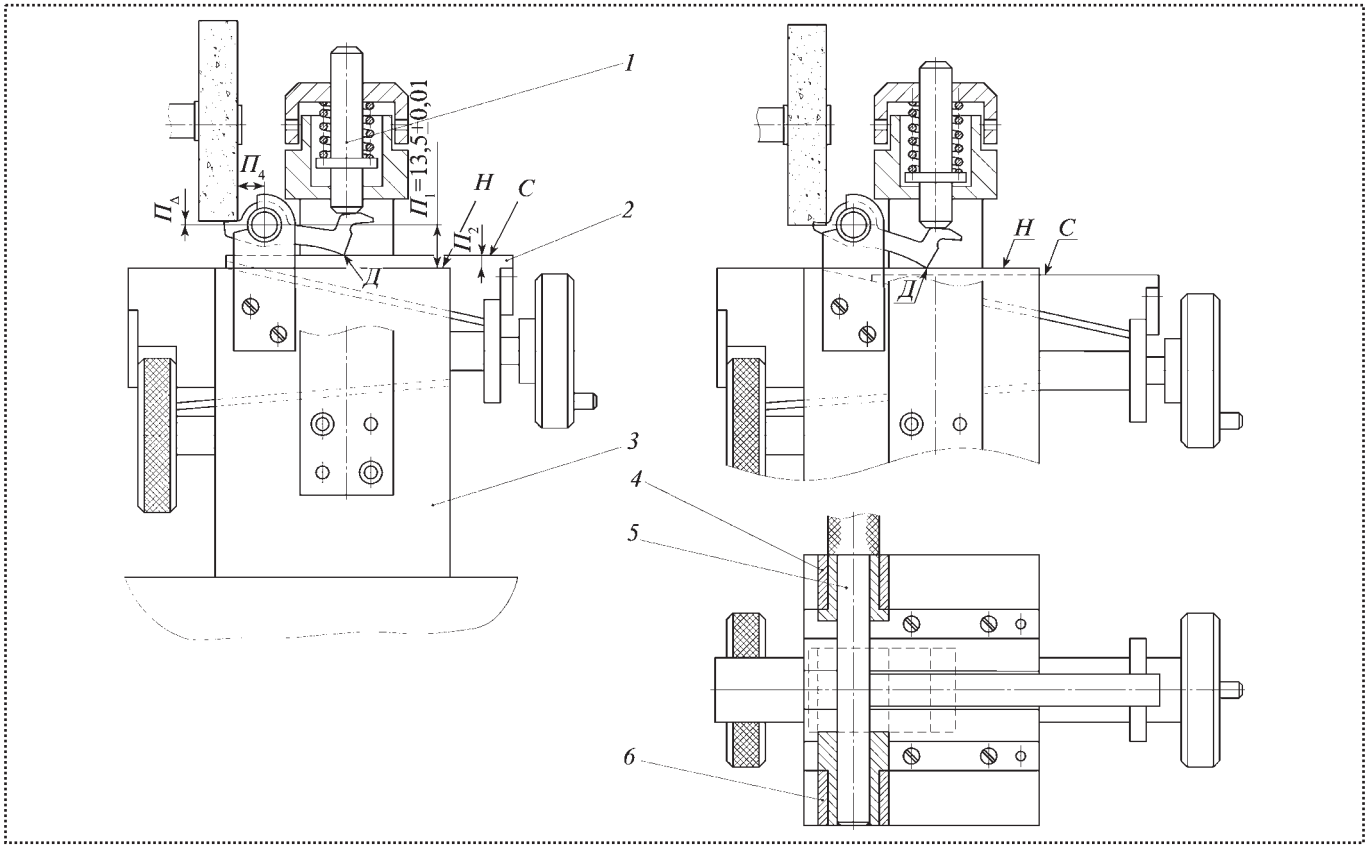


Рис. 3. Конструкция установочного приспособления

ния определяют действительный для каждого конкретного механизма выход выступа *Д* шептала относительно поверхностей *Г* крышки. Осуществляется это в следующем порядке. Приспособление корпусом *1* устанавливают на поверхностях *Г* крышки *4* таким образом, чтобы измерительный шток *2* своей торцовой плоскостью *Ш* оперся на выступ *Д* шептала. При этом измерительный шток перемещается на величину A'_{Δ} – действительного выхода выступа *Д* шептала относительно поверхностей *Г* крышки. Это положение штока фиксируют с помощью зажима *3*.

Равенство размеров $Б_1$ штока и $Б_2$ корпуса приспособления обеспечивает выход противоположной торцовой плоскости *Ш* штока относительно плоскости *Ц* корпуса на величину A'_{Δ}.

В свою очередь равенство размеров A_{Δ} механизма и $Б_3$ корпуса обеспечивает недоход плоскости *Ш* изме-

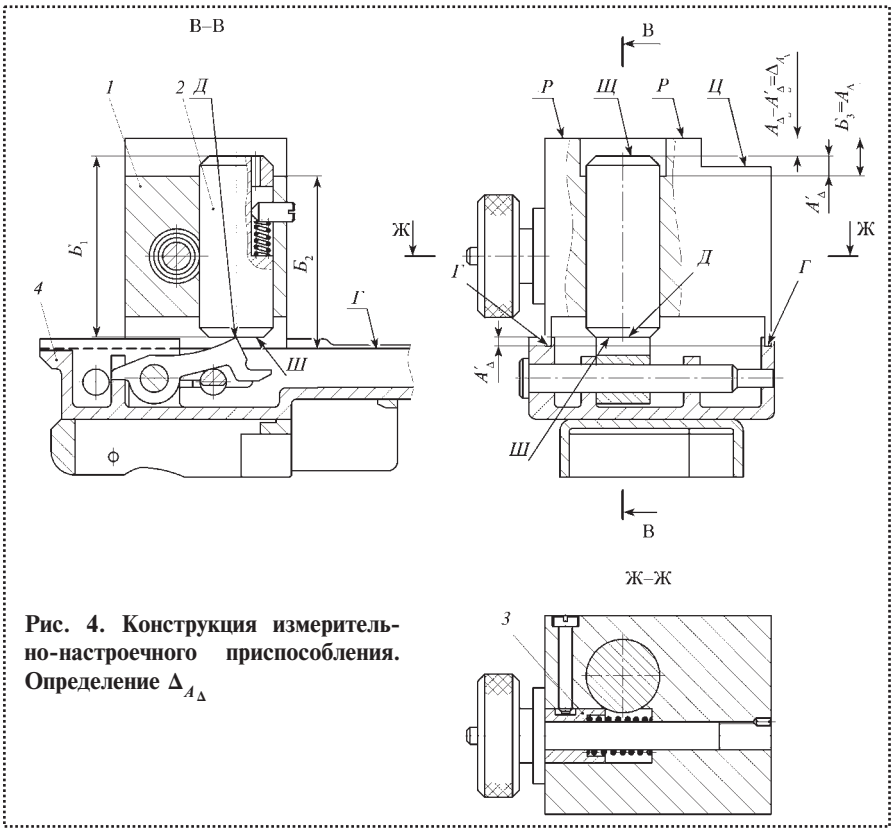


Рис. 4. Конструкция измерительно-настроечного приспособления. Определение $\Delta_{A_{\Delta}}$

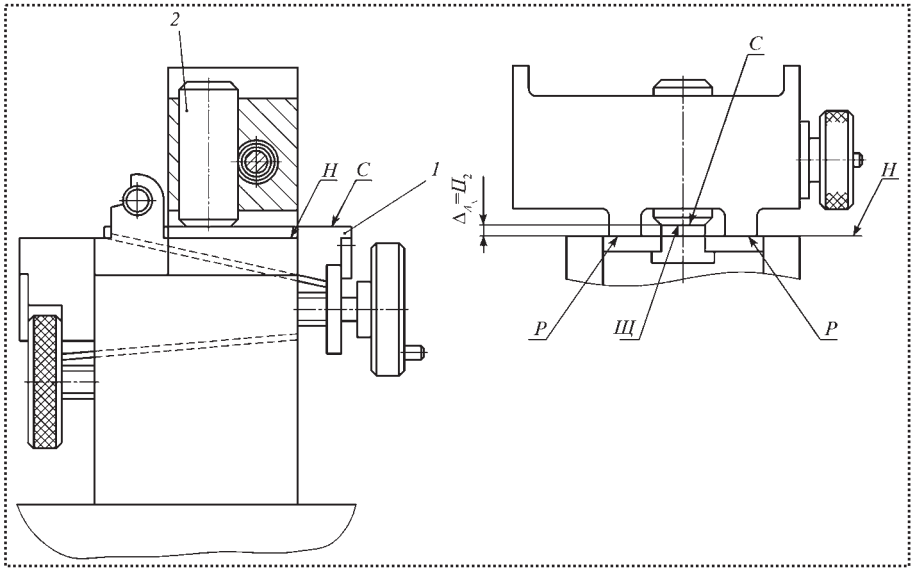


Рис. 5. Настройка установочного приспособления

рительного штока до плоскостей *Р* приспособления, величина которого равна отклонению действительного положения выступа *Д* шептала. Определив действительное положение шептала в поступившем на сборку механизме, измерительно-настроечное устройство устанавливают плоскостями *Р* на базовую поверхность *Н* рабочего приспособления (рис. 5), после чего опора-клин *1* доводят до касания плоскостью *С* плоскости *Ш* измерительного штока *2*.

В результате между плоскостями *С* и *Н* обеспечивается размер $П_2$, равный отклонению положения выступа *Д* шептала, поступившего на сборку спускового механизма.

Определение максимально допустимых отклонений на размеры, определяющие положения элементов станочной установки, проводилось из условия обеспечения при сборке узла нормированного прилегания плоскостей *Л* и *М*. В качестве допустимых отклонений замыкающего звена $П_\Delta$ размерной цепи станочной установки были приняты значения:

$$\Delta_{в\,П_\Delta} = Г_1^{max} - Г_3^{min} = \Delta_{в\,Г_1} - \Delta_{н\,Г_3} = 0{,}063 \text{ мм}, \quad (8)$$

$$\Delta_{н\,П_\Delta} = Г_1^{min} - Г_3^{max} = \Delta_{н\,Г_1} - \Delta_{в\,Г_3} = -0{,}053 \text{ мм}. \quad (9)$$

Проверку правильности назначенных по условию обеспечения регламентированного прилегания поверхностей *Л* и *М* норм точности на размерные параметры станочной установки осуществляли по условию обеспечения при сборке узла, предписанной величины выхода выступа *Д* плеча шептала относительно плоскостей *Г* крышки. При этом авторами учитывались возможные колебания относительного положения выступа *Д* плеча шептала, вызываемые погрешностью формы сопрягаемых поверхностей деталей и контактными деформациями, имеющими место при приложении к шепталу статической нагрузки. Допуск замыкающего звена, с учетом влияния перечисленных факторов, определяется из уравнения

$$T\,A_\Delta = \Sigma\xi_i\,TA_i + \Sigma\xi_j\,T\,A_{j\,ф} + \Sigma\xi_q\,T\,A_{q\,к}, \quad (10)$$

где $\Sigma\xi_i\,TA_i$, $\Sigma\xi_j\,TA_{jф}$ и $\Sigma\xi_q\,TA_{q\,к}$ – составляющие допуска замыкающего звена, учитывающие соответственно допуски размеров механизма, погрешности формы сопрягаемых поверхностей и контактные деформации поверхностей, воспринимающих приложенную к шепталу статическую нагрузку.

Определение составляющих $\Sigma\xi_j\,T\,A_{j\,ф} = T\,A_{\Delta\,ф}$, $\Sigma\xi_q\,TA_{q\,к} = TA_{\Delta к}$ производилось на основе экспериментальных данных. Порядок проведения экспериментов и их результаты приведены далее. Расчетный допуск $TA'_\Delta = \Sigma\xi_i\,TA_i$, являющийся составляющим допуска замыкающего звена механизма, определяется из уравнения

$$TA'_\Delta = TA_\Delta - TA_{\Delta\,ф} - TA_{\Delta к}. \quad (11)$$

В эксперименте шептало *1* объединяли с моделью крышки *2* спускового механизма (рис. 6).

Базирование шептала производилось с помощью пальца *5*, а его угловое положение определялось сопряжением плоскости *М* с плоскостью крышки *Л*.

Сопряжение пальца в отверстиях модели крышки, сопряжение шептала с пальцем осуществлялись по посадке H9 / h8. Поверхность *Л* модели крышки проходила обработку фрезерованием, обработанная поверхность имела параметр шероховатости Rz = = 20 мкм. Шлифованная поверхность *М* рычага имела параметр шероховатости Rz = 10 мкм.

Измерения проводили с помощью индикатора *3* с ценой деления шкалы 0,001 мм, закрепленного на стойке *4*. Отклонения положения контрольной точки *Д* плеча шептала фиксировались в вертикальной плоскости. Для варьирования условий контакта поверхностей пальца с шепталом и корпусом, измерения отклонений положения контрольной точки *Д* проводили по следующей схеме (см. табл.):

а – измерение положения контрольной точки – совмещение отметки "0" шкалы со стрелкой индикатора;

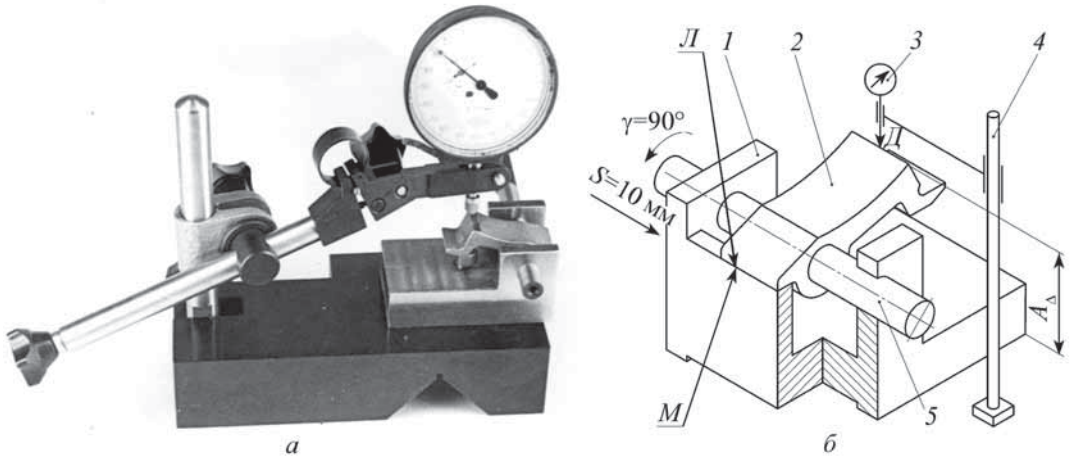


Рис. 6. Установка (*а*) и схема измерения положения т. *Д* шептала (*б*)

б – поворот пальца на 90° – измерение;

в – поворот пальца на 90° – измерение;

г – поворот пальца на 90° – измерение;

д – сдвиг пальца в осевом направлении относительно шептала на 10 мм – измерение;

е – поворот пальца на 90° – измерение и т.д.

Измерение положения контрольной точки *Д* осуществляли при приложении силы 5 Н, обеспечивающей беззазорный контакт сопрягаемых поверхностей. Сила, действующая на плечо шептала по направлению стрелки, создавалась с помощью пружины. Наблюдаемые значения случайной величины x_i, которые определялись при изменении положений контрольной точки *Д* в десяти моделях, сведены в таблицу.

Анализ результатов измерения показывает, что несмотря на то, что каждая сборочная модель собиралась из одних и тех же деталей, наблюдалось изменение положения контрольных точек *Д* при измерении всех десяти моделей. Различие в положении контрольных точек может быть объяснено лишь тем, что с изменением относительного положения цилиндрической поверхности пальца и поверхностей отверстия в крышке и шептале их контакт происходил по разным точкам. В результате менялось относительное положение основных и вспомогательных баз.

Статистическая обработка результатов измерения, проведенная по методике, изложенной в работе [2], позволила определить среднее значение случайной

Колебания положений контрольной точки *Д* в десяти моделях

№ модели	Изменение относительного положения сопрягаемых поверхностей шептала и пальца, мкм															
	а	*б*	*в*	*г*	*д*	*е*	*ж*	*з*	*и*	*к*	*л*	*м*	*н*	*о*	*п*	*р*
1	0	2	–1	0	2	–1	1	0	1	1	0	2	0	2	1	1
2	0	+1	0	+0	+1	2	2	0	–1	1	0	1	–1	0	0	–1
3	0	+2	+3	1	1	0	–1	0	1	0	1	0	2	2	1	0
4	0	–1	1	2	–1	2	1	2	0	1	2	0	1	–1	0	1
5	0	2	–1	2	1	1	0	2	1	–1	0	0	1	0	1	1
6	0	3	1	2	2	–1	0	1	1	1	2	0	3	2	1	3
7	0	1	0	1	2	2	3	0	2	1	–1	0	2	2	1	0
8	0	1	1	0	1	0	2	–1	2	1	0	1	2	3	1	0
9	0	1	2	0	1	2	1	2	–1	0	2	1	2	0	2	1
10	0	2	2	1	–1	1	0	0	1	2	1	1	2	3	0	2

величины $\bar{x} = 0{,}84$ мкм и ее среднеквадратическое отклонение $S = 1{,}078$ мкм. Для определения составляющей допуска замыкающего звена $T\,A_{\Delta\,ф}$ следует найти его верхнее $\Delta_{в\,A_{\Delta ф}}$ и нижнее $\Delta_{н\,A_{\Delta ф}}$ предельные отклонения. Возможное рассеивание случайной величины определяем по уравнениям [1]:

$$\Delta_{в\,A_{\Delta ф}} = \bar{x} + A_1 S\,, \qquad (12)$$

$$\Delta_{н\,A_{\Delta ф}} = \bar{x} - A_2 S\,. \qquad (13)$$

Для симметричного распределения по закону Гаусса

$$A_1 = A_2 = A = \frac{t_{q,k}}{\sqrt{n-1}} + l_v\,\eta\,, \qquad (14)$$

где $t_{q,k}$ – параметр распределения Стьюдента;

η – коэффициент распределения;

l_v – коэффициент;

n – число измерений.

Значения коэффициента l_v подсчитаны и приведены в работе [1]. Составляющая допуска замыкающего звена, учитывающая погрешности формы сопрягающихся поверхностей $TA_{\Delta\,ф} = \Delta_{в\,A_{\Delta ф}} - \Delta_{н\,A_{\Delta ф}} = 0{,}006$ мм, что составляет всего около 1,5 % от величины предписанного техническими условиями допуска на размер A_Δ. Небольшое влияние погрешностей форм и относительного положения сопрягаемых деталей на отклонения замыкающего размера объясняется малым числом стыков (два), имеющих поверхности небольшой площади при высокой точности обработки.

На основании проведенного расчета можно сделать заключение, что в рычажных механизмах, типичным представителем которых является механизм, изображенный на рис. 1, при механизированной пригонке нет необходимости вносить поправки, учитывающие погрешности формы сопрягаемых поверхностей вследствие незначительного их влияния на размер замыкающего звена.

Библиографический список

1. **Дунаев П.Ф., Леликов О.П.** Расчет допусков размеров. М.: Машиностроение, 1981. 189 с.

2. **Солонин И.С.** Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 216 с.

3. **Суслов А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 206 с.

ВОЛЧКЕВИЧ
Леонид Иванович
24.03.1930–25.06.2012

25 июня 2012 г. после тяжелой болезни на 83 году жизни скончался видный ученый, заслуженный работник высшей школы, доктор технических наук, профессор, бывший заведующий кафедрой **Волчкевич Леонид Иванович**.

Леонид Иванович родился в 1930 г. в Белоруссии. Вся его трудовая и научная деятельность связана с МВТУ – МГТУ имени Н.Э. Баумана: в 1948 г. студент факультета МТ, затем инженер, ассистент, доцент, профессор, заведующий кафедрой МТ-11. Свой выдающийся интеллект, широчайшие знания он направил на развитие научной школы по автоматизации производственных процессов. Имел свыше 300 научных трудов и изобретений. Являлся руководителем Комитета по автоматизации ВСНТО СССР.

Леонид Иванович много сил отдал становлению и развитию кафедры МТ-11. Среди его учеников есть видные ученые, преподаватели, руководители кафедр в разных странах бывшего СССР. Он никогда не был равнодушен к проблемам высшей школы в России. Его острые статьи в центральной прессе вызывали дискуссии в среде небезразличных людей. Являясь большим поклонником спорта, он до последнего времени занимался бадминтоном, был чемпионом России среди ветеранов.

Светлая память об учителе, коллеге и друге навсегда останется в наших сердцах.

УДК 621. 717 (045)

А.А. Демин, *аспирант,* **И.А. Титов,** *канд. техн. наук (Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова),*
Е.В. Шанулин, *главный технолог (ПО "Спецавтоматика", г. Бийск)*
E-mail: presskov@mail.ru

Повышение качества сборки соединений с натягом при увеличенном допуске на изготовление деталей

На основе численного моделирования определены размеры и форма деформируемого элемента, обеспечивающие постоянное значение несущей способности прессового соединения при сборке спринклерного оросителя. Экспериментальными исследованиями подтверждено стабильное качество сборки при увеличенных допусках на изготовление сопрягаемых деталей.

On the basis of numerical simulation are defined size and shape of the deformable element, ensuring a constant value of bearing capacity of forging connections when building sprinklers. Experimental studies confirmed the stable quality of workmanship of increased manufacturing tolerances of mating parts.

Ключевые слова: сборка, соединение с натягом, моделирование, допуск, несущая способность, пластическая деформация.

Keywords: assembly, connection with interference, simulation, tolerance, load-bearing capacity, plastic deformation.

Одним из возможных направлений повышения производительности и автоматизации процессов сборки является замена резьбовых соединений прессовыми. Наибольший эффект от такой замены может быть достигнут, если требуется обеспечить строго заданное значение осевого усилия в собранном узле нормируемым моментом затяжки. При сборке резьбовых соединений для этого требуется применение специальной технологической оснастки, существенно осложняется автоматизация процесса сборки, снижается производительность. В качестве примера можно привести процесс сборки широко применяемого в системах пожаротушения спринклерного оросителя (рис. 1, *а*), производимого ЗАО ПО "Спецавтоматика" (г. Бийск). Необходимые фиксация элементов и точное значение осевого усилия, обеспечивающих, с одной стороны, качественную сборку с сохранением целостности термоколбы *2*, с другой – необходимую деформацию упругого элемента *1*, осуществляются резьбовым упором *3*, вкручиваемым вручную с использованием динамометрической отвертки. Производительность сборки в таком случае составляет 3–4 оросителя в минуту, а доля брака существенно зависит от квалификации сборщика.

Для ускорения сборки и уменьшения доли брака предложено вместо резьбового упора применить прессовое соединение с использованием колпачка *5* (рис. 1, *б*) в качестве фиксирующего элемента [2]. При этом из технологического процесса изготовления оросителя исключается операция нарезания внутренней резьбы в его корпусе, сокращается время и трудоемкость сборки.

В предложенной технологии сборку можно осуществлять по двум вариантам: запрессовкой с требуемым натягом колпачка *5* в корпус *4*, либо вставкой колпачка в корпус с зазором и последующей пластической деформацией колпачка, обеспечивающей необходимую несущую способность соединения.

Запрессовка колпачков малого диаметра (5...6 мм), как показали проведенные исследования, является довольно сложной задачей, поскольку требует повышенного качества обработки поверхности сопрягаемых деталей, а погрешности формы и диаметральных размеров не должны превышать гарантированный натяг в соединении, что соответствует 6–7-му квалитетам точности их изготовления. Поэтому в общем слу-

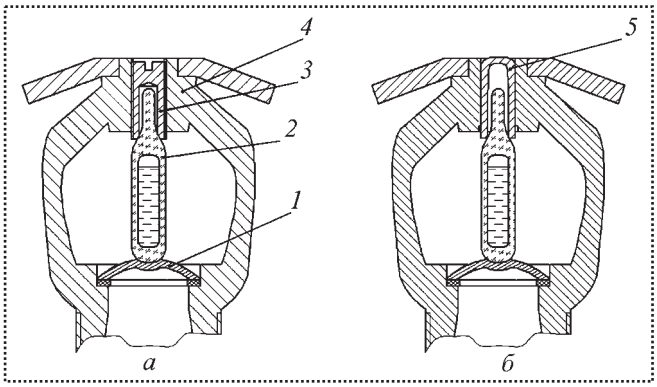


Рис. 1. Спринклерный ороситель с резьбовым фиксирующим элементом (*а*) и с запрессованным колпачком (*б*)

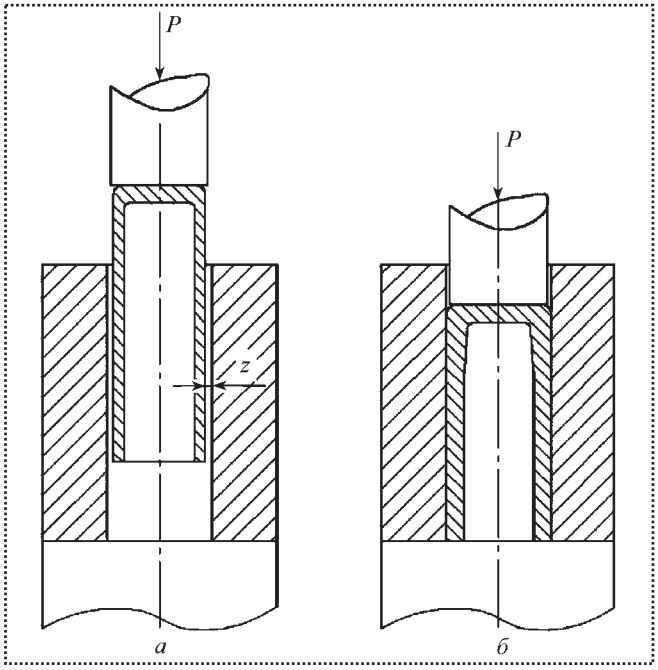


Рис. 2. Схема получения соединения:
а – начало запрессовки; *б* – завершение запрессовки

чае неразъемное соединение такого типа целесообразно получать способом, согласно которому пластически деформируемый элемент свободно (т.е. с гарантированным зазором *z*) вставляют внутрь охватывающей корпусной детали, затем рабочим инструментом производят осадку вставленного элемента (рис. 2).

Следует отметить, что при изготовлении колпачка методом холодной листовой штамповки точность диаметральных размеров колпачка соответствует 10-му квалитету. Точность отверстия охватывающей корпусной детали обусловлена операцией чернового сверления и соответствует 14-му квалитету. Таким образом, двухсторонний зазор между колпачком и охватывающей деталью до запрессовки может достигать 0,2 мм, при этом гарантированный зазор для "свободной" вставки должен быть не менее 0,06 мм.

Очевидно, что несущая способность, т.е. максимальное усилие, которое необходимо приложить для распрессовки неразъемного соединения, значительно зависит от первоначального зазора между колпачком и корпусом оросителя. Поэтому целью исследования было определение размеров и конфигурации колпачка, которые бы обеспечили требуемую несущую способность соединения в широком диапазоне зазоров.

Математическая модель

На основе конечно-элементной модели были проведены численные исследования влияния первоначального зазора на несущую способность соединения. Расчетная модель при этом имела следующие упрощения:

• коэффициент трения в расчетной модели являлся постоянной величиной на всей площади контактной поверхности и не зависел от величины контактного давления;

• деформации корпусной детали не учитывались ввиду их малости по сравнению с деформациями колпачка;

• рассматривалась осесимметричная модель соединения.

По результатам моделирования были получены графики распределения нормального давления на сопрягаемых поверхностях неразъемного соединения и зависимость несущей способности неразъемного соединения от первоначального зазора между колпачком и корпусом оросителя для колпачков, имеющих различные конструктивные формы.

Известно, что качество соединения с натягом определяется не только средней величиной контактного давления в сопрягаемых поверхностях, но и характером его распределения[1]. При этом концентраторы напряжения на контактной поверхности соединяемых деталей приводят к образованию микродефектов на их поверхностном и приповерхностном слоях и снижают несущую способность соединения, так как коэффициент трения значительно снижается при увеличении контактного давления. В ходе моделирования были получены значения нормального давления на всей площади контактных поверхностей, которые показали, что в соединениях колпачка с переменной толщиной стенки (рис. 3, *а*) наблюдается более равномерное распределение контактного давления, чем в соединениях колпачка с постоянной толщиной стенки (рис. 3, *б*). При этом несущую способность соединения $F_н$ рассчитывают по формуле

$$F_н = f_{тр}\, 2\,\sigma r \int_0^h \sigma_n(h)\, dh, \qquad (1)$$

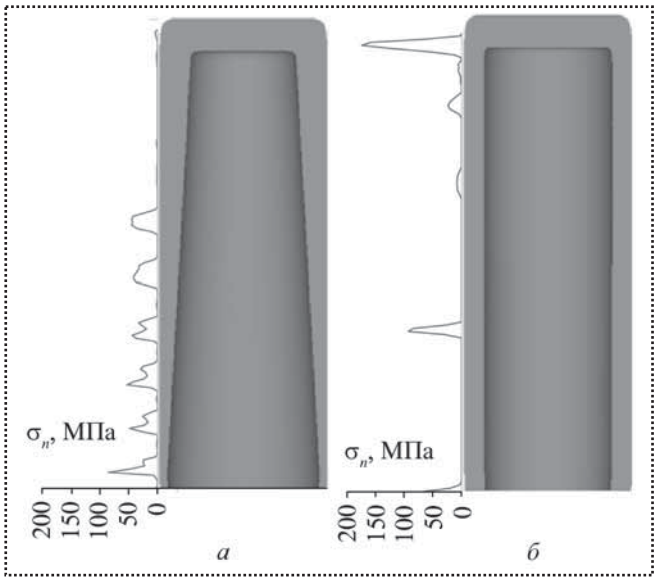


Рис. 3. Характер распределения нормальных напряжений σ_n на контактной поверхности колпачка:
а – с переменной толщиной стенки; *б* – с постоянной толщиной стенки

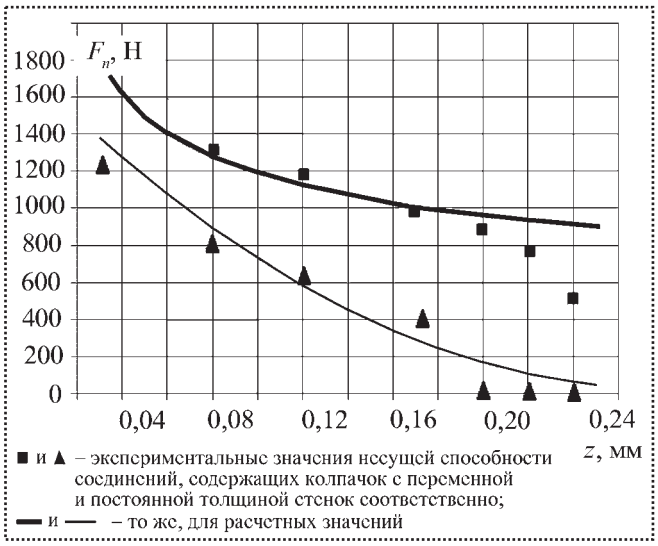


Рис. 4. Зависимость несущей способности прессового соединения от первоначального зазора при сборке

где $f_{тр}$ – коэффициент трения; σ_n – нормальное напряжение на контактной поверхности; h – длина контактной поверхности соединения.

Для колпачка с переменной толщиной стенки несущая способность также имела увеличенное значение (рис. 4).

Конечно-элементное моделирование также показало, что колпачок с постоянной продольной жесткостью, т.е. с постоянной толщиной стенки эффективно выбирает зазоры, не превышает 0,1 мм.

Проверка адекватности результатов моделирования

Экспериментальные исследования по определению несущей способности соединения колпачка и корпуса спринклерного оросителя в осевом направлении проводили на разрывной машине Р-0,5 с использованием оснастки, позволяющей жестко фиксировать взаимное расположение соединяемых элементов. Соединения были получены при различных значениях двухстороннего зазора для колпачков, имеющих постоянную продольную жесткость, и для колпачков, имеющих переменную продольную жесткость. Усилие сборки в каждом из испытаний составляло 2 кН. Колпачки были изготовлены из меди М1 многопереходной вытяжкой, корпус оросителя (охватывающая деталь) – из латуни Л53. Шероховатость поверхности колпачка до запрессовки, определенная с помощью профилографа-профилометра 250, составляла 1,3 мкм, а внутренней поверхности отверстия в корпусной детали – 12,5 мкм. При этом были получены экспериментальные значения несущей способности соединения в интервале зазоров от 0,01 до 0,25 мм, которые представлены на рис. 4.

Сопоставляя результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований и моделирования,

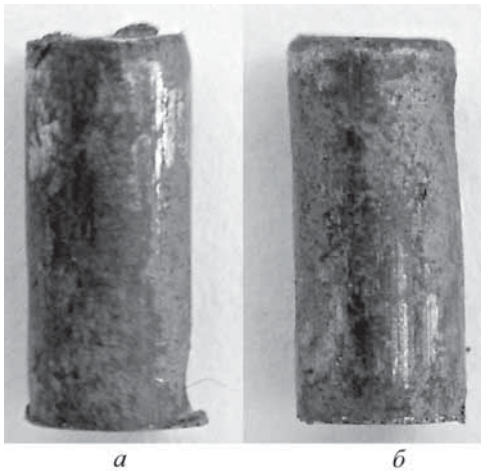


Рис. 5. Колпачок, имеющий постоянную (*а*) и переменную (*б*) толщину стенки после запрессовки

можно сделать вывод о высокой достоверности расчетной конечно-элементной модели. Следует заметить, что при зазорах, превышающих 0,2 мм, имеются существенные расхождения в значениях несущей способности, полученных расчетным и экспериментальным методом. Причиной такого несоответствия является поперечная потеря устойчивости реального колпачка при больших степенях его деформации, что не учитывается в осесимметричной модели.

Характер распределения контактных напряжений на сопрягаемых поверхностях оценивался косвенно по наличию продольных рисок в местах значительных контактных напряжений на поверхности колпачка, представленных (рис. 5) более светлыми областями, образуемыми на поверхности при снятии темной оксидной пленки во время запрессовки.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что наиболее эффективным, исходя из условия обеспечения максимальной несущей способности при минимальных затратах на изготовление, оказался колпачок с переменной продольной жесткостью, имеющий линейное изменение толщины стенки и изготовленный из меди М1. Деформация колпачка при сборке позволяет получать стабильную несущую способность прессового соединения при увеличении допусков на изготовление сопрягаемых поверхностей с 6–7-го до 10–14-го квалитетов.

Библиографический список

1. **Гречищев Е.С., Ильященко А.А.** Соединения с натягом: расчеты, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

2. **Патент РФ № 71551.** Спринклерный ороситель / С.А. Волынкин, А.М. Чудаев, Е.В. Шанулин. № 2007118168/22; заявл.15.05.2007 опубл. 20.03.2008.

УДК 621.828

А.В. Королев, *д-р техн. наук,* **В.В. Болкунов,** *канд. техн. наук,*
А.Г. Мирошкин, *аспирант (Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина)*
E-mail: miroshkin_artem@mail.ru

Технология сборки радиально-упорных шариковых подшипников с охлаждением внутреннего кольца

Представлены результаты проведенных авторами экспериментальных исследований в области радиально-упорных шариковых подшипников. Описаны способ холодной сборки, методика определения температуры охлаждения внутреннего кольца при последующем его сжатии для обеспечения сборки подшипника.

Presents the results carried out experimental research by the authors in the field of angular contact ball bearings. Described a method of cold assembly, defined cooling temperature of the inner ring, at which there is a contraction for the assembly of the bearing.

Ключевые слова: холодная сборка, шариковый подшипник.

Keywords: cold assembly, ball bearing.

На подшипниковых заводах в настоящее время применяется технология сборки подшипников качения, при котором внутреннее кольцо помещают в наружное кольцо и смещают его эксцентрично последнему. В зазор между кольцами помещают шарики, затем внутреннее кольцо смещают в сторону шариков, и шарики распределяют равномерно в дорожках качения, после чего устанавливают сепаратор. При этом, если расстояние между крайними шариками меньше диаметра дорожки качения внутреннего кольца, сборку осуществляют за счет нагрева или деформации (сжатия) наружного кольца [2, 4]. Эту технологию сборки нельзя применить для подшипников с массивными неразъемными сепараторами, так как в этом случае сборка подшипника должна осуществляться с шариками, установленными в гнезда сепаратора.

Для таких подшипников применяется такая технология сборки радиально-упорных неразъемных шарикоподшипников, при которой одно из колец подшипника выполнено с замком, т.е. один из бортиков кольца срезан с образованием конической поверхности, а величина "замка" предусмотрена в пределах не менее двух минимальных радиальных зазоров. Для обеспечения сборки подшипника его наружное кольцо разогревается, а внутреннее кольцо имеет комнатную температуру. По этой технологии [1] шарики, установленные в гнезда сепаратора, предварительно собирают на основании устройства с кольцом подшипника, имеющим полную дорожку качения, и в этот комплект сверху вдвигают конической частью кольцо подшипника с замком. При этом шарики, находящиеся у нижней кромки дорожки качения, сдвигаются конусом вдвигаемого кольца к дну дорожки качения и вверх, навстречу движению вдвигаемого кольца, но не доходят до дна, а заклинивают между конусом и дорожкой качения в угле, равном углу трения, после чего происходит деформация вдвигаемого кольца в месте перехода конуса на дорожку качения, деформация шариков. При этом, если отдельные шарики выскальзывают из состояния заклинивания, то они ударяются о противоположную кромку дорожки качения и на них образуются вмятины типа "лодочек". Возникающие повреждения деталей снижают ресурс подшипника и ухудшают его виброакустические характеристики.

При использовании технологии сборки с нагревом наружного кольца подшипника энергозатраты и возможные температурные деформации делают сборку неэффективной, КПД нагревателей крайне низок, а повышенная температура при сборке ухудшает условия труда.

Разработка новой технологии сборки радиально-упорных шариковых подшипников с замком на одном из колец, повышающей эффективность сборки, расширяющей технологические возможности и обеспечивающей требуемые показатели качества, является актуальной задачей. Этого можно достичь, если в известном способе сборки радиально-упорных шариковых подшипников с замком на одном из колец перед окончательной сборкой внутреннее кольцо подшипника охладить до температуры, обеспечивающей сжатие кольца на величину не менее значения величины замка, подать на позицию сборки, на которой на него надеть наружное кольцо в сборе с комплектом шариков, вставленных в гнезда сепаратора.

Специалистами Саратовского подшипникового завода и учеными Саратовского государственного

технического института разработана и исследована технология сборки радиально-упорных подшипников с охлаждением внутреннего кольца, новизна которого подтверждена патентом [3].

Температура охлаждения внутреннего кольца, при которой происходит его сжатие для обеспечения сборки подшипника, определяется по формуле:

$$T = \frac{N + i + \Delta d_B}{\beta d} - T_o , \qquad (1)$$

где N – величина замка;

i – термический сборочный зазор;

Δd_B – компенсационное сжатие кольца, учитывающее увеличение размеров от прогрева при транспортировке и сборке;

β – коэффициент линейного сжатия материала внутреннего кольца (для закаленной стали $\beta = -9{,}5 \cdot 10^6$ °C^{-1});

d – номинальный размер сборочного соединения (диаметр бортика кольца);

T_o – температура окружающей среды.

Температура T должна быть меньше T_{min} – температуры, достижимой при использовании определенного хладагента.

Значение i принимается равным минимальному зазору, обеспечивающему свободное соединение деталей подшипника с учетом их геометрических параметров и перекоса в начальный момент сборки. Зазор i можно ориентировочно принимать по посадке $H7/g6$.

Время охлаждения кольца определяется из выражения:

$$T_{охл} = \frac{d_o \rho C_т}{4\alpha} \frac{x(1-\nu)}{x + 0{,}5(1-\nu)} (-\ln\theta) , \qquad (2)$$

где d_o – диаметр кольца;

ρ – плотность материала кольца, кг/м^3;

$C_т$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

α – коэффициент теплоотдачи;

x, ν – геометрические коэффициенты, зависящие от размеров и формы кольца;

θ – относительная температура.

Если рассчитанная температура оказывается ниже достижимой в условиях данного производства при использовании хладагента, то принимают комбинацию способов термовоздействия охлаждения внутреннего кольца и нагрев наружного кольца для достижения увеличенного сборочного зазора до температуры, обеспечивающей необходимое функциональное расширение. Температура кольца диаметром 50...240 мм при среднем времени транспортирования от позиции охлаждения к позиции сборки изменяется не более чем на 20 °C. Поэтому при предварительных расчетах можно принять:

$$(i + \Delta) = 0{,}01\sqrt{\Delta d_B} . \qquad (3)$$

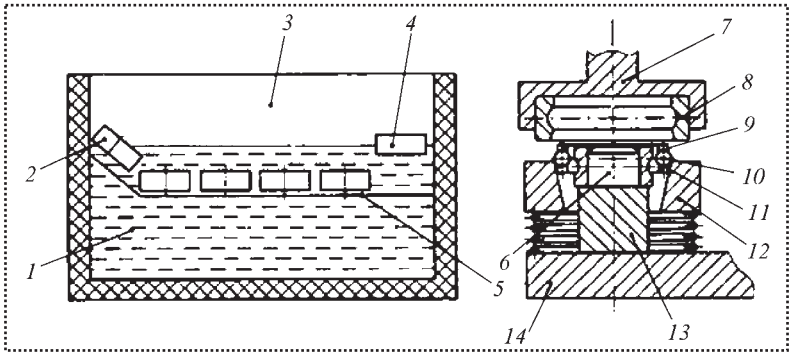


Схема сборки подшипника с замком на наружном кольце:
1 – жидкость, охлаждаемая сухим льдом; *2* – внутреннее кольцо подшипника; *3* – рабочая камера для охлаждения; *4* – подъемник; *5* – транспортер; *6* – фиксатор; *7* – оправка; *8* – наружное кольцо; *9* – сборочная позиция; *10* – шарики; *11* – сепаратор; *12* – коническое кольцо-фиксатор; *13* – выталкиватель; *14* – основание

Для радиально-упорных шариковых подшипников массовых серий базовых типоразмеров значение величины замка не превышает 60 мкм. Схема сборки подшипника с замком на наружном кольце изображена на рисунке.

Сборку подшипника осуществляют следующим образом. Внутреннее кольцо подшипника *2* подается в рабочую камеру *3*, где происходит его охлаждение. Рабочая камера представляет собой стальной бак с хорошей термоизоляцией в виде стеклянной или шлаковой ваты, минеральной пробки, пробковых плит или других термоизоляционных материалов.

В качестве жидкости *1* используют спирт (денатурированный), ацетон или авиационный бензин. В жидкость, залитую в рабочую камеру, кладут небольшими порциями сухой лед, который, испаряясь, понижает температуру жидкости. При температуре жидкости –78,5 °C прекращается интенсивное выделение паров и дальнейшее снижение температуры жидкости. В процессе работы в рабочую камеру периодически добавляют небольшие порции сухого льда. Внутреннее кольцо подшипника охлаждают в рабочей камере, подготовленной к работе при описанных условиях.

На сборочную позицию *9* охлажденное внутреннее кольцо подшипника подается из рабочей камеры и устанавливается на фиксатор *6* до плотного прилегания к основанию *14*. Наружное кольцо *8* устанавливают в оправку *7*, соосную с фиксатором *6*. Сепаратор *11* в сборе с комплектом шариков *10* устанавливают в

подпружиненное коническое кольцо-фиксатор *12*, которое при подаче наружного кольца вниз смещается и шарики устанавливаются в дорожке качения кольца. При дальнейшей подаче наружного кольца шарики смещаются в радиальном направлении и вниз, пока не достигнут дна дорожки качения. Перекатываясь через вершину замка, они занимают рабочее положение. При этом происходит выравнивание температуры колец подшипника. Подшипник становится неразъемным и при помощи выталкивателя *13* удаляется со сборочной позиции.

Технико-экономическая эффективность новой технологии по предложенному способу состоит в следующем:

1) снижаются энергозатраты и тем самым уменьшается себестоимость сборочной операции;

2) повышается качество подшипников, так как исключаются дефекты на деталях подшипников;

3) улучшаются условия труда;

4) повышается долговечность подшипников за счет необратимых изменений механических свойств стали в результате структурных превращений при низких температурах.

Библиографический список

1. **А.с. 1760206 СССР,** MKU3 F16C 43/04. Способ сборки радиально-упорных шариковых подшипников с замком на одном из колец / В.Е. Куняев, Г.В. Селезнев, А.Н. Костюков. № 4869848/27; заявлено 28.09.90; опубл. 07.09.92. Бюл. №33. 6 с.

2. **Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В.** Подшипники качения: справочник. М.–Л.: Машгиз, 1960. С. 66–68.

3. **Патент РФ № 2310107.** Способ сборки радиально-упорных шариковых подшипников / А.В. Королев, В.В. Болкунов, К.С. Крайнов.

4. **Смирнов М.В.** Устройство для сборки радиально-упорных шариковых подшипников. Подшипниковая промышленность. Вып. 9. М.: НИИ Автопром, 1975. С. 53–55.

УДК 621.039.533

В.Н. Павлин, С.В. Голубев, *инженеры,* **Э.Г. Новинский, В.Ф. Головко,** *д-ра техн. наук*
(ОАО "ОКБМ Африкантов")
E-mail: golubevsv@okbm.nnov.ru

Опыт изготовления барабанов отработавших сборок для перегрузочного комплекса 4-го энергоблока Белоярской АЭС

Рассмотрены общие вопросы сборки барабанов отработавших сборок для 4-го энергоблока Белоярской АЭС.

General issues on assembling spent FA drums at the 4th Beloyarskaya NPP power unit have been analyzed.

Ключевые слова: сборка, барабан отработавших сборок, АЭС, БН-800.

Keywords: assembly, spent FA drum, NPP, BN-800.

В настоящее время на Белоярской АЭС ведется сборка реактора БН-800, разработанного ОАО "ОКБМ Африкантов". Он будет работать в составе 4-го энергоблока электрической мощностью 880 МВт. Реактор разработан с максимальным использованием научно-технических решений, проверенных в процессе 30-летней эксплуатации предшествующего реактора БН-600, а введенные в проект усовершенствования обеспечивают существенное повышение уровня безопасности и экономичности энергоблока. Реактор БН-800 должен продемонстрировать возможность удовлетворения основных требований к ядерной энерготехнологии XXI в. Плановый срок ввода его в эксплуатацию – 2014 г.

ОАО "ОКБМ Африкантов" является не только разработчиком реакторной установки, но и комплектным поставщиком оборудования для Белоярской АЭС. В производственных цехах предприятия изготовлена значительная часть наиболее сложного и ответственного оборудования для Белоярской АЭС: оборудование для перегрузки тепловыделяющих сборок (ТВС), главные циркуляционные насосы I и II контуров, комплект исполнительных механизмов системы управления и защиты (ИМ СУЗ), гидрозатворы, устройство контроля геометрии отработавших сборок активной зоны, различные приводы, захваты и арматура.

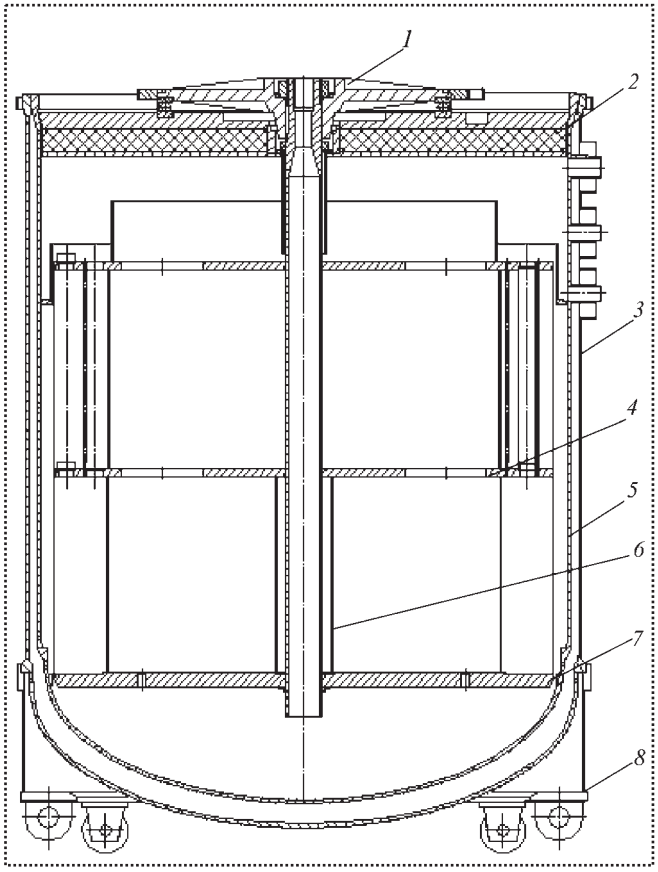


Рис. 1. Барабан отработавших сборок:
1 – зубчатое колесо; *2* – опорная плита; *3* – наружный корпус; *4* – дистанционирующая плита; *5* – внутренний корпус; *6* – ротор барабана; *7* – дистанционирующий платик

Наиболее интересным с точки зрения конструкции и технологии изготовления является оборудование для перегрузки свежих и отработавших ТВС. Особенно сложными в изготовлении из оборудования перегрузки ТВС являются перегрузочные барабаны, включающие в себя барабан свежих сборок (БСС) и барабан отработавших сборок (БОС). Барабаны схожи по конструкции, но с точки зрения технологии изготовления наибольший интерес представляет БОС (рис. 1).

Барабан отработавших сборок предназначен для размещения, хранения и расхолаживания отработавших ТВС, а также для перемещения их от каналов перегрузочного бокса к каналам отмывочного бокса.

Корпус барабана представляет собой герметичный сосуд, состоящий из внутреннего (основного) и наружного (страховочного) корпусов, соединенных между собой в верхней части герметичным сварным швом. Для обеспечения связи барабана с системой охлаждения в верхней части основного и страховочного корпусов имеются пять патрубков: три напорных, один сливной и один переливной. Материал корпусов – нержавеющая сталь аустенитного класса. Общий вид корпуса барабана показан на рис. 2.

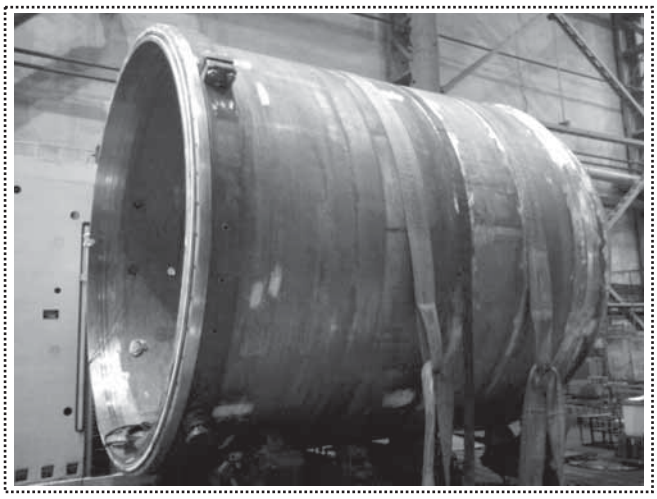


Рис. 2. Корпус барабана отработавших сборок

Внутри основного корпуса установлен ротор, в конструкции которого имеются гнезда для установки в них перегружаемых ТВС. В верхней части корпуса барабана установлена плита, которая служит опорой подшипника ротора и выполняет функции теплоизоляции и биологической защиты. На валу ротора установлено зубчатое колесо, которое находится в зацеплении с ведущей шестерней вала привода барабана, осуществляющего поворот ротора. Тележка предназначена для транспортирования барабана отработавших сборок при его монтаже на месте применения.

Значительные габариты БОС (высота более 5,7 м, диаметр более 4 м) и масса (в сборе с ротором – более 67 т), а также высокая точность сопрягаемых поверхностей конструкции позволяют говорить об уникальности технологии его изготовления.

Основными деталями, составляющими наружный и внутренний корпуса барабана, являются днища и обечайки. Днища были изготовлены методом горячей штамповки, обечайки корпусов – методом вальцовки без механической обработки цилиндрических поверхностей, с последующей установкой на днища, поэтому при их изготовлении требовалась высокая точность исполнения геометрических параметров, которая была обеспечена технологическим процессом.

Сварка корпусов БОС выполнялась в горизонтальном положении с применением сварочных автоматов. Технологическая оснастка, применяемая в процессе сварки, позволила обеспечить минимальные поводки сборочных единиц, несмотря на то что на каждом из корпусов барабанов выполнено более 150 м сварных швов.

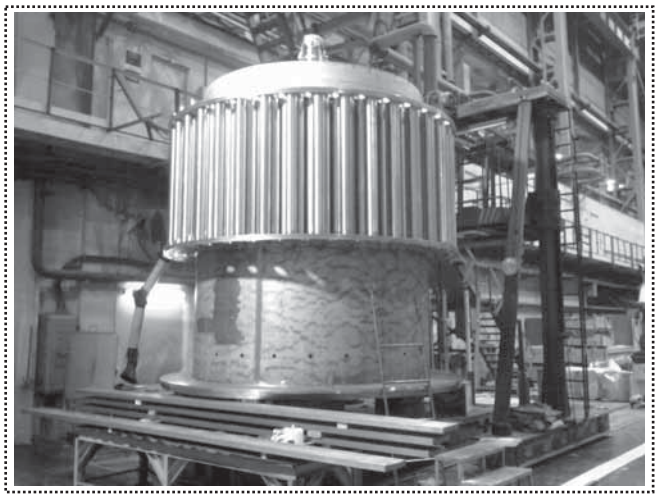


Рис. 3. Ротор барабана отработавших сборок

При изготовлении ротора барабана наиболее сложными в изготовлении являлись дистанционирующие плиты ротора барабана (рис. 1 и 3).

Для получения требуемого размера с заданной точностью плиты ротора изготавливали из толстолистового материала. В процессе изготовления отработана методика правки заготовок до кривизны не более 5 мм на всей плоскости плиты.

Обработка основных деталей и подсборок БОС выполнена на токарно-карусельном станке с диаметром планшайбы 6 м, для обработки отверстий применяли новые высокопроизводительные расточные станки.

При сборке внутреннего корпуса, входящего в состав корпуса БОС, необходима подгонка дистанционирующих платиков в районе днища корпуса, установленных на глубине более 5 м при горизонтальном расположении барабана. Точность измерения и подгонки платиков (±0,1 мм) была обеспечена использованием геодезического оборудования.

Рис. 4. Собранный барабан отработавших сборок на стенде ОАО "ОКБМ Африкантов"

Для сборки, кантовки и строповки деталей и сборочных единиц, входящих в состав БОС, учитывая значительные габариты и массы, были разработаны специальные схемы кантовки и строповки, спроектированы и изготовлены необходимые грузоподъемные приспособления и технологический постамент.

Гидравлические испытания наружного и внутреннего корпусов выполнялись в горизонтальном положении, что позволило значительно снизить трудоемкость при заполнении и сливе большого объема воды. Учитывая успешное выполнение этих испытаний, гидравлические испытания межкорпусного пространства после сборки корпуса барабана были заменены на пневматические испытания.

Одна из самых сложных операций сборки корпуса барабана – установка внутреннего корпуса в наружный с обеспечением соосности отверстий под патрубки во внутреннем и наружном корпусах в заданных пределах с высокой точностью. Соосности отверстий под установку патрубков обеспечивались обработкой отверстий в наружном корпусе методом фрезерования с использованием системы ЧПУ на расточном станке с ходом колонны 6 м и вертикальным перемещением шпинделя 2,5 м. С целью исключения попадания стружки в межкорпусное пространство устанавливали специальные резиновые кольцевые камеры.

Обработка крепежных отверстий барабана и тележки выполнялась раздельно. Необходимая технологическая точность обработки узлов обеспечила собираемость при последующей сборке изделия.

Наиболее ответственные и трудоемкие операции по сборке БОС произведены с применением кранового оборудования грузоподъемностью 100 т на специальном стенде, позволяющем в условиях предприятия не только выполнить сборочные операции, но и обеспечить испытания и имитацию всего процесса перегрузки топлива (рис. 4). На стенде выполнялись наиболее ответственные работы: установка ротора барабана и плиты опорной в корпус БОС, установка зубчатого колеса, регулировка зубчатого зацепления, выставление зазоров, заданных конструкторской документацией и обкатка изделия.

В процессе изготовления оборудования для реакторной установки БН-800, специалистами ОАО "ОКБМ Африкантов" накоплен бесценный опыт по изготовлению крупногабаритного оборудования высокой точности. Неординарные технологические решения, примененные при изготовлении оборудования для АЭС, могут успешно применяться и в процессе производства оборудования для других отраслей народного хозяйства.

УДК 621.791.048

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

Пайка без припоя

Приведены недостатки действующего ГОСТа по пайке, обоснована необходимость его корректировки. Показаны особенности процесса пайки при производстве биметаллов и нанесении защитных металлических покрытий на стальные изделия.

The shortcomings of the current state standart are resulted, necessity of its updating is proved, features of process of the soldering are shown by manufacture of bimetals and drawing of protective metal coverings on steel products.

Ключевые слова: пайка, наплавка, заливка, сварка, биметаллы.

Keywords: the soldering, наплавка, pouring, welding, bimetals.

Способы формирования сварных и паяных соединений сходны между собой. В основе каждого способа лежит процесс межатомного взаимодействия между металлами, приводящий к образованию монолитного соединения между элементами конструкции. Сходство способов соединения обусловливает и сходство в их определениях, приводимых в разных источниках.

В ГОСТ 17325–79 приводится обобщающее определение пайки: "пайка – образование соединений с межатомными связями путем нагрева соединяемых металлов ниже температуры их плавления, их смачивания припоем, затекания в зазор и последующей его кристаллизации".

В ГОСТ 2601–84 приводится обобщающее определение способа сварки: "сварка – получение неразъемного соединения посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и/или пластического деформирования".

Определение пайки было сформулировано в период применения в промышленности в основном традиционного способа – капиллярной пайки, требующей установки между соединяемыми деталями узких, капиллярных зазоров (до 0,3 мм), заполняемых жидким припоем, после его расплавления вне зазора. В настоящее время разработаны и широко применяются при сборке крупных металлоконструкций способы некапиллярной пайки, с широкими сборочными зазорами между соединяемыми деталями. Определение способа некапиллярной пайки также приводится в ГОСТе. Паяные соединения с большой толщиной паяного шва обладают свойствами, равнозначными свойствам паяемых металлов.

В настоящее время признана необходимость пересмотра стандартов по пайке и приведение их в соответствие с современными достижениями и технологическими возможностями пайки. На научно-технической конференции "Пайка – 2008" было принято решение организовать работу по пересмотру стандартов по всему комплексу вопросов и материалам в области пайки. Поэтому приводимое в ГОСТе указание на затекание припоя в зазор можно считать устаревшим, отражающим особенность частного способа капиллярной пайки и не отвечающим требованиям к общему определению.

Из сопоставления определений способов пайки и сварки следует, что их различие заключается не в процессе формирования соединений, а в допускаемых значениях температурно-силовых параметров этого процесса – температуре нагрева и в прикладываемом усилии на соединяемые детали. Процессы сварки и пайки могут проводиться в широких интервалах температур, начиная с комнатной. При пайке висмутовыми или галлиевыми припоями температура нагрева может составлять 20 °С [16]. При такой же температуре может проводиться холодная сварка металлов. Однако если при сварке максимальная температура нагрева не ограничена, то при пайке она должна быть ниже температуры плавления соединяемых металлов.

При пайке и сварке на соединяемые детали может оказываться силовое воздействие. При капиллярной пайке и электродуговой сварке соединений с фиксированными зазорами между соединяемыми деталями и с использованием присадочного металла силовое воздействие не применяется.

Силовые воздействия при пайке и сварке имеют различное назначение. При пайке прикладываемое усилие сжатия деталей выполняет технологическую роль – удерживает припой в зазоре, способствует сближению паяемых поверхностей и повышает плотность паяного шва. При пайке не должны меняться относительное положение и форма паяемых элементов. При сварке усилие сжатия должно приводить к пластическому деформированию соединяемых эле-

ментов в целях получения плотного контакта между металлами и увеличения площади соединения. При сварке с нагревом пластическая деформация может достигать 40, без нагрева – 80 %. При соблюдении температурно-силовых параметров процессов обеспечивается их качественное протекание и получение соединений с задаваемыми свойствами.

Пайка – это процесс образования металлических связей между твердыми и жидкими металлами в результате атомного взаимодействия между ними, при определенных температурно-силовых параметрах, не приводящих к изменению формы и размеров соединяемых элементов конструкции. В отличие от процесса пайки понятие способа пайки должно включать последовательность технологических процессов и основные параметры их осуществления.

Поэтому выражение "образование соединения", приводимое в ГОСТе, можно понимать не как образование паяного соединения двух деталей через прослойку припоя, а как соединение твердого и жидкого металлов по границе их контактирования в результате межатомного взаимодействия.

Из приведенного следует, что между процессами формирования паяного и сварного соединений существует принципиальное отличие. Пайка является естественным процессом образования металлической связи между жидким и твердым металлами по закономерностям растворно-диффузионного процесса, установленного для соединяемых металлов. Сварка – это принудительный способ формирования соединения путем перемешивания расплавов соединяемых металлов или путем пластического деформирования их в твердом состоянии.

Такое же понимание процесса пайки заложено в ее теоретических основах [13]: "физико-химическая сущность процесса образования паяного соединения по любому методу одна и та же – взаимодействие расплавленного припоя с основным металлом, характер которого определяется соотношением их свойств, режимов и условий процесса пайки. Этот признак положен в основу классификации пайки".

На необоснованность применения в области технологических процессов пайки терминов, применяемых в сварочном производстве, указывали одни из разработчиков теории пайки Н.Ф. Лашко и С.В. Лашко в своем фундаментальном труде [8]: "Во многих работах, посвященных анализу технологических процессов пайки, не учитывается различие между автономным и контактным плавлением основного металла и поэтому без достаточного основания некоторые технологические процессы системы пайки относят к процессам сварки плавлением, называя сваркой плавлением или наплавкой, вместо пайки, напайки соответственно". Под автономным плавлением твердого (основного) металла авторы понимали процесс плавления металла при достижении им температуры плавления. Под контактным локальным плавлением авторы понимали процесс плавления металла в результате физико-химического взаимодействия твердого и жидкого металлов и протекания между ними растворно-диффузионного процесса при температурах значительно ниже температуры плавления твердого металла.

Авторы предлагали обозначить термином "напайка" процесс нанесения слоя полностью или частично расплавленного припоя (сплава) на поверхность твердого металла или контактном локальном плавлении его и сцепления слоя жидкой фазы с твердым металлом при затвердевании. В частных случаях "напайка" может иметь специальное название: напайка оловом или его сплавом – лужение; напайка цинком – цинкование; напайка алюминием – алюминирование и т.д.

Предлагалось "спайкой" называть процесс присоединения полностью или частично жидкого металла к твердому при контактном плавлении последнего и сцепления его с жидкой фазой при ее затвердевании. Спайка может происходить при заливке жидкого металла, например припоя на сращиваемый материал с последующим затвердеванием.

Однако в любом случае атомное взаимодействие жидкого и твердого металлов с протеканием растворно-диффузионным процессом между ними необходимо всегда называть процессом пайки. Термины "наплавка", "заливка" обозначают производственные технологические приемы и к процессу пайки отношения не имеют. Заливка и наплавка могут приводить к возникновению сварочного процесса или осуществляться без какого-либо взаимодействия между металлами.

Паяные соединения деталей с прослойкой припоя между ними по существу представляют собой монолитную трехслойную конструкцию подобно биметаллической, широко применяемой в различных отраслях промышленности. При изготовлении биметалла между соединяемыми твердым металлом и слоем жидкого металла происходит межатомное взаимодействие по механизму и закономерностям процесса пайки с образованием монолитной биметаллической конструкции [5].

Биметаллы обладают большим разнообразием важнейших свойств, которых невозможно достигнуть в одном металле или сплаве. Применение биметаллов позволяет наиболее эффективно и экономически выгодно использовать современные ценные металлы и сплавы. Процесс пайки, сопровождающий изготовление биметаллов и многослойных монолитных конструкций, обеспечивает предельную простоту и эффективность их производства. В биметаллической паяной конструкции могут содержаться слои из различных од-

нородных и неоднородных металлов: сталь–сталь, сталь–чугун, сталь–медь, сталь–бронза, сталь–баббит и другие сочетания.

Основными способами изготовления биметаллических изделий являются: заливка на поверхность твердого металла слоя жидкого металла; отливка в форму, содержащую твердую заготовку; намораживание жидкого металла на поверхность твердого и т.д. Условиями формирования биметаллического монолитного изделия являются: различие в температурах плавления соединяемых металлов и способность жидкого металла образовывать металлические связи с твердым металлом, т.е. обладать свойствами припоя.

При изготовлении биметаллов путем нанесения жидкого слоя металла на поверхность твердого другого состава между ними в результате атомного взаимодействия образуется металлическая связь и получает развитие растворно-диффузионный процесс пайки, который приводит к изменению состава и структуры приконтактных областей соединяемых металлов.

Изготовление монолитного биметалла может производиться и другими способами – путем соединения двух твердых металлов прокаткой, прессованием или пайкой с использованием припоя. При формировании второго слоя биметалла из жидкого металла происходит совмещение одновременно двух технологических операций – процесса пайки и процесса формирования второго слоя из жидкого металла, что значительно упрощает и удешевляет производство биметаллов.

Изготовление биметаллов может производиться с подплавлением и без подплавления твердого металла [10]. Подплавление твердого металла является признаком сварочного процесса, который сопровождается перемешиванием расплавов, в результате чего на межфазной границе всегда образуется развитая зона переменного состава и часто – различные кристаллизационные прослойки. Развитие структурной и химической неоднородности может привести к образованию различных дефектов и к значительному снижению механических и пластических свойств соединения.

В соединениях медных сплавов со сталью степень неоднородности приконтактных областей (химическая, структурная, механическая) тем больше, чем больше степень подплавления стали при достижении в ней температуры плавления.

Насыщение расплавов медных сплавов железом в результате подплавления стали приводит к изменению параметров кристаллической решетки, что вызывает возникновение внутренних напряжений в слое, возрастающих с возрастанием степени проплавления стали [3]. Отпуск биметалла не приводит к существенному изменению величины и характера напряжений. Снижаются также коррозионные и антифрикционные свойства, тепло- и электропроводность, пластические свойства биметалла.

При наплавке медных сплавов (бронз) на сталь без ее подплавления на границе контакта жидкого и твердого металлов протекает естественный растворно-диффузионный процесс, при котором происходит растворение стали в расплаве наплавки с образованием кристаллизационной зоны, а элементы наплавки проникают в сталь, образуя диффузионную зону. Кристаллизационная зона образуется при ограниченной взаимной растворимости элементов соединяемых металлов в результате выпадения кристаллов новой фазы на основе перемещаемых в расплав элементов стали. Диффузионная зона образуется, если скорость диффузии элементов расплава в сталь превышает скорость растворения последней в жидком расплаве при отсутствии барьерного слоя. Толщина диффузионного слоя при наплавке кремнистой и алюминиевой бронзы на сталь составляет 2...15 мкм. В случае сварочного процесса на границе металлов, т.е. при подплавлении стали, диффузионная зона (прослойка) не образуется.

При наплавке медно-никелевыми сплавами (6 % Ni) на сталь без ее подплавления обеспечивается получение изделий с необходимой прочностью при статических и циклических нагрузках, твердостью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами.

Следовательно, по состоянию твердого металла на границе взаимодействия при изготовлении биметаллов можно судить о процессе формирования соединения металлов. При подплавлении твердого металла на границе контакта жидкого и твердого металлов протекает сварочный процесс. При отсутствии признаков подплавления протекает естественный процесс пайки по закономерностям растворно-диффузионного процесса.

Процесс формирования соединения разнородных металлов без припоя за счет расплавления более легкоплавкого металла и смачивания им более тугоплавкого металла в источнике [2] справедливо отнесен к области некапиллярной пайки. Однако эта уникальная разновидность полноценного способа пайки почему-то названа "сваркой–пайкой", хотя не подтверждается ни единым признаком сварочного процесса, зато налицо необходимый комплекс признаков естественного процесса пайки с ее растворно-диффузионным процессом, формирующим паяное соединение. Этот способ применяют для предупреждения образования хрупких интерметаллических прослоек, когда необходимо не только устранить возможность сплавления и перемешивания жидких сплавов, но и максимально ограничить взаимодействие твердого и

жидкого металлов, что возможно осуществить только при паяльном процессе.

Действительно, при заливке жидкой бронзы между двумя стальными пластинами или лентами обеспечивается получение трехслойной композиции, которая по существу является полноценным паяным соединением, так как по определению соединение состоит из двух нагреваемых металлов с затекшим в зазор между ними жидким сплавом – припоем.

С целью снижения температурного воздействия на соединяемые металлы процесс осуществляют при твердожидком состоянии наплавляемого металла [11]. Такой способ наплавки осуществляют тогда, когда наплавляемый металл имеет достаточно широкий температурный интервал затвердевания. К таким металлам относят сплавы на медной основе. При этом способе соединяемые металлы, например сталь–бронза, приводят в плотный контакт, нагревают до температуры твердожидкого состояния бронзы. Образующаяся в бронзе жидкая фаза вступает во взаимодействие со сталью, смачивая ее. При изотермической выдержке и необходимом давлении за счет физико-химических процессов на границе раздела металлов формируется биметаллическое соединение, свойства которого определяются природой взаимодействующих металлов. Этим же способом можно соединять однородные материалы (бронза–бронза), при этом соединение происходит в результате образования общей зоны сплавления и ее последующей кристаллизации. Формирование равнопрочного бронзе соединения завершается после определенной изотермической выдержки при температуре твердожидкого состояния бронзы. Эта выдержка (5...10 мин) необходима для структурного перераспределения в зоне соединения, в результате которого вместо сплошной прослойки хрупкой составляющей (бывшей жидкой фазы) к поверхности стали непосредственно примыкают различные по величине зерна пластичного и прочного твердого раствора на основе меди с переменной концентрацией железа. Этот процесс и композитная пайка – идентичны.

Растворно-диффузионные процессы при этом способе реализуются в узких приконтактных слоях соединяемых материалов – до 0,1 мм. В результате их химический состав остается неизменным, хрупкие фазы отсутствуют.

При кристаллизации жидкого сплава, имеющего широкий температурный интервал плавления, происходят усадочные явления, ликвации, возникает пористость, что ослабляет прочность наплавленного слоя. С целью получения плотных и прочных наплавленных слоев применяют технологии наплавки с кристаллизацией под давлением. При заливке расплава бронзы с температурой 1150...1100 °С давление при кристаллизации создавали 40...200 МПа. При заливке расплава алюминия с температурой 700...800 °С давление при кристаллизации может составлять 25...100 МПа [1].

Ни в одном из источников по технологии производства биметаллов процессы, протекающие при атомном взаимодействии твердого и жидкого металлов, не рассматриваются как процессы пайки. Эти процессы либо обезличиваются, либо имеют произвольные наименования – "сварка", "соединение в твердожидком состоянии" и т.д.

Процессы взаимодействия твердого и жидкого металлов основательно изучены и рассмотрены в теории самого древнего способа соединения металлов – пайки. Однако не признавая эти процессы паяльными, разработчики биметаллов, тем не менее, в своих исследованиях и разработках опираются на формулировки и закономерности, изложенные в теории пайки [7]. Поэтому можно утверждать, что в основе способов формирования биметаллов без оплавления твердого составляющего находится процесс пайки, имеющий фундаментально разработанную теорию и богатую многовековую практику создания сборных монолитных металлоконструкций.

Создание биметаллических конструкций показывает, как велики возможности пайки как способа монолитного соединения металлов при наличии или в отсутствие припоя при твердом состоянии соединяемых металлов или при жидком состоянии одного из них. Процесс пайки так органически встраивается в общий процесс формирования монолитных конструкций, что его не замечают даже разработчики и специалисты по созданию многослойных монолитных конструкций.

Анализ процессов соединения большого разнообразия металлов в биметаллические конструкции показывает, что все они протекают по правилам и закономерностям, установленным в теории пайки.

Кинетика растворно-диффузионного процесса, протекающего при взаимодействии твердого и жидкого металлов в процессе формирования биметаллов, основательно разработана в теории пайки [16] и зависит от состава взаимодействующих металлов или сплавов и характера диаграмм состояния систем элементов, входящих в состав биметалла. Процесс растворения твердого металла в жидком может протекать до насыщения последнего у границы взаимодействия с выделением твердых кристаллов. При хорошей растворимости элементов расплава в твердом металле преобладает процесс атомной диффузии компонентов жидкого металла в твердом, с образованием слоя твердых растворов, состав и толщина которого определяются законами диффузии. Если же металлы образуют между собой интерметаллидные соединения на границе взаимодействия, то возникает процесс образования этих соединений в результате реактивной диффузии.

Широкое применение в машиностроении имеют биметаллические изделия, полученные путем монолитного соединения стальных заготовок с жидким алюминием. По диаграмме состояния сталь-алюминий при их взаимодействии образуется целый ряд интерметаллидных фаз с различным соотношением компонентов. Во всех случаях взаимодействия железа с алюминием быстро образуется сплошной слой интерметаллидов в виде глубоко проникающих выступов, растущих внутрь стали. В алюминии, на границе взаимодействия, образуется сплошной тонкий слой с ровной границей. Оба слоя сходного состава имеют различный механизм образования. Слой интерметаллидов в стали образуется в результате реактивной диффузии, такой же слой в алюминии образуется путем кристаллизации твердой фазы из жидкого алюминия, "загрязненного" растворившимся в нем железа. Толщина слоя интерметаллидов возрастает во времени по параболической зависимости, и находится в экспоненциальной зависимости от температуры процесса заливки.

Такие химические процессы протекают при заливке жидкого алюминия в форму, содержащую твердую стальную заготовку, нагретую до определенной температуры.

В целях уменьшения толщины хрупкой диффузионной зоны и повышения прочности паяных соединений в отливке, в расплав алюминия вносят легирующие компоненты (присадки) – медь, никель, кремний. Заметное влияние на повышение прочности связи алюминия со сталью оказывают цинк и кремний.

Получение паяных соединений без сплошных интерметаллидных прослоек (фаз) на границе взаимодействия твердого и жидкого металлов может быть достигнуто путем изменения температуры нагрева твердого металла и уменьшения продолжительности контакта взаимодействующих металлов. При высокой скорости растворно-диффузионного процесса получить пластичные соединения возможно при использовании барьерных покрытий на твердом металле.

При получении биметаллических отливок для защиты металлов от окисления применяют активные паяльные флюсы на основе буры с добавкой фтористых соединений.

Как известно, при пайке стальных изделий в качестве припоя может применяться чугун [12]. Сочетание этих же металлов может применяться и при изготовлении биметаллов. В обоих случаях процесс пайки протекает по известным закономерностям. В отличие от пайки стальных изделий, при которой необходим равномерный нагрев деталей и припоя до температуры плавления последнего, при заливке стальной заготовки жидким чугуном температура нагрева стальной заготовки (900 °С) значительно ниже температуры заливаемого жидкого чугуна (1200 °С). При таком температурном режиме заливки начинает протекать растворно-диффузионный процесс взаимодействия жидкого и твердого металлов, т.е. процесс пайки, при котором происходит обогащение стали углеродом и легирующими элементами, содержание которых в чугуне превышает их содержание в стали. В чугуне происходит растворение поверхностных слоев стали. Активная диффузия углерода в сталь приводит к образованию в приконтактной области трех зон переходного слоя. Одна зона имеет структуру заэвтектоидной стали, другая – структуру эвтектоидной стали. Далее следует структура исходной стали. С повышением температуры нагрева стали и чугуна размеры указанных зон увеличиваются [9].

При подобных температурных режимах производится наплавка высоколегированных коррозионно-стойких сталей (1Х18Н12Т) на низкоуглеродистую (без оплавления последней). С целью предупреждения образования хрупких карбидов рекомендуется, чтобы содержание углерода в коррозионно-стойкой стали превышало его содержание в низкоуглеродистой стали.

Промежуточная зона соединения между различными сталями, между сталями и чугунами чаще всего представляет собой плавный переход от структур одного сплава к структурам другого, без явных границ раздела. Однородность соединяемых сплавов дает возможность получать паяные биметаллические соединения с отсутствием хрупких фаз в промежуточной зоне, что обеспечивает высокую прочность паяных соединений в биметалле.

Наряду с наплавкой и заливкой в формы при изготовлении сложных биметаллических конструкций, в производстве биметаллических материалов и заготовок применяется простой и производительный способ намораживания [6], при котором заготовку (ленту, лист, проволоку) пропускают через ванну с расплавом жидкого металла другого состава. В процессе движения заготовки через жидкий сплав происходит разрушение оксидных пленок на границе контакта металлов, расплав смачивает твердый металл и в результате создаются условия для протекания диффузионного процесса между соединяемыми металлами. Специальное охлаждающее устройство обеспечивает высокую скорость затвердевания жидкого слоя металла. Процесс нанесения жидкого металла на поверхность твердого может быть одно- или двухсторонним. С целью стабилизации толщины намораживаемого слоя заготовки выполняют с отбортованными краями, а также с поперечными ребрами. Возможно заполнение расплавом пространства между двумя лентами с получением полноценного паяного соединения. По своим техно-

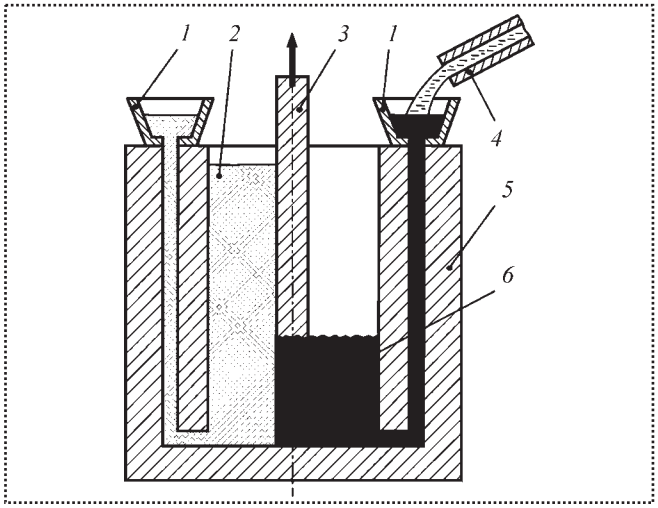


Рис. 1. Способ последовательной заливки металлов с применением выдвижной перегородки:
1 – разливочная воронка; *2* – залитый металл; *3* – выдвижная перегородка; *4* – желоб; *5* – форма; *6* – заливаемый металл

логическим возможностям метод намораживания можно считать универсальным.

При изготовлении деталей машин (клапанов, рабочих органов землеройных машин и т.д.), работающих при больших статических и динамических нагрузках, при высоких температурах (700 °С), в химически агрессивных средах, на их рабочие поверхности намораживают более стойкие сплавы путем подачи на всю рабочую поверхность детали, очищенную от оксидных пленок жидким флюсом, определенного объема наплавляемого жидкого сплава. После взаимодействия с поверхностью детали происходит одновременная кристаллизация сплава по всей поверхности детали. Разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона процесс намораживания деталей обеспечивает многократное повышение работоспособности деталей.

Уникальные возможности пайки, как процесса соединения металлов, проявляются не только при ее совмещении с процессом формирования одной из деталей, но и при последовательном формировании обоих или нескольких соединяемых деталей. На рис. 1 представлен способ последовательной заливки металлов с применением выдвижной перегородки, защищающей поверхность затвердевшей, но еще нагретой заготовки от окисления.

После заливки в форму первого слоя (заготовки) и ее затвердевания охлаждают заготовку до температуры, при которой исключается ее подплавление при заливке второго слоя другого металла. В процессе заполнения формы перегородка поднимается, обеспечивая протекание процесса пайки между затвердевшей заготовкой и жидким металлом с образованием между ними металлической связи.

На рис. 2 представлены схемы получения трехслойной (*а*), двухслойной (*б*) и двухслойной цилиндрической (*в*) деталей с помощью одновременной заливки двух жидких металлов в два кристаллизатора [5]. При изготовлении трехслойной детали кристаллизаторы *1* и *2* смещают по высоте друг относительно друга. В кристаллизатор *1* заливают металл будущей заготовки *3*, который, затвердевая, вытягивается вниз в кристаллизатор *2*, при этом в последний начинают заливать металл плакирующего слоя *4*. Взаимодействуя с твердой, но еще горячей поверхностью заготовки *3*, жидкий плакирующий металл, затвердевая, прочно соединяется с ней. Чтобы получить двухслойную деталь (см. рис. 2, *б*), в кристаллизаторе *1* отливают сначала заготовку *3*, а затем в кристаллизаторе *2* плакирующий слой *4*. Производство цилиндрической детали включает следующие операции (см. рис. 2, *в*): металл плакирующего слоя *4* заливают в кристаллизатор *2*, где он приобретает пустотелую форму, которая после затвердевания заполняется металлом основного слоя *3*. При этом полость, сформированная застывшим плакирующим металлом, служит кристаллизатором для металла основного слоя. Этим способом можно изготавливать слоистые заготовки различного профиля.

О соответствии процесса межатомного взаимодействия твердого и жидкого металлов при изготовлении биметаллов процессу пайки свидетельствует разработанная в ИЭС им. Е.О. Патона технология плакирования припоем тонких стальных листов путем наплавки слоя припоя на сутунку [4]. Нанесение толстых слоев припоя заданной толщины и состава на основе металлургических технологических процессов проще и надежнее, чем нанесение их с помощью всевозможных физико-химических процессов. Для получения паяных слоистых заготовок используют два технологических процесса. Первый предусматривает заливку рас-

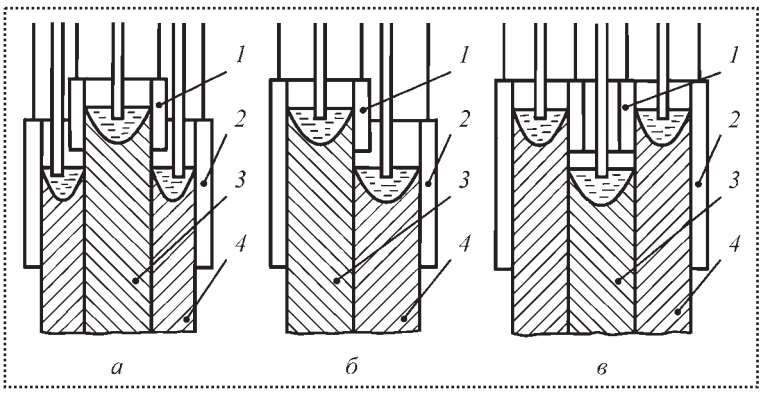


Рис. 2. Схема отливки плоских трехслойных (*а*) и двухслойных (*б*), а также двухслойных цилиндрических (*в*) деталей

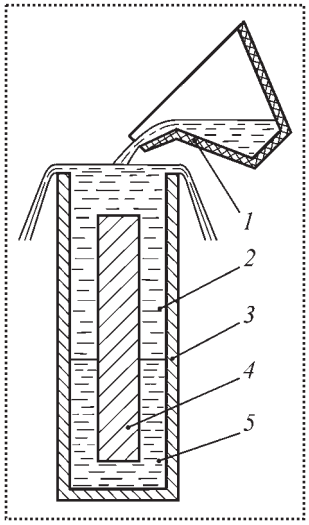


Рис. 3. Схема заливки расплавленного припоя:
1 – разливочный ковш; *2* – жидкий шлак; *3* – технологическая форма; *4* – наплавляемая сутунка; *5* – жидкий припой

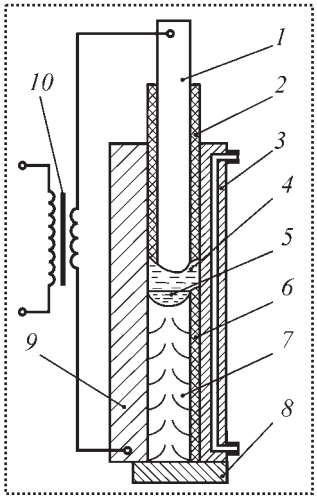


Рис. 4. Схема получения плакированной заготовки методом электрошлаковой наплавки неподвижным электродом (из припоя):
1 – электрод; *2* – изолирующее покрытие; *3* – водоохлаждаемый кристаллизатор; *4* – шлаковая ванна; *5* – металлическая ванна; *6* – шлаковая корка; *7* – наплавленный металл; *8* – поддон; *9* – наплавляемая сутунка; *10* – источник питания (трансформатор)

плавленного припоя в полость, образованную сутункой и технологической формой (рис. 3). Для получения прочного сцепления слоев в эту полость предварительно помещают необходимый объем паяльного флюса и всю сборку нагревают в печи до температуры, несколько превышающую температуру плавления припоя. При заливке расплав припоя вытесняет расплавленный флюс из полости, а заполнивший ее припой надежно смачивает сутунку. После остывания изделия образуется плакированная припоем заготовка с металлической связью между слоями.

Второй способ основан на электрошлаковой наплавке неподвижным электродом – припоем (А.С. № 332680). В пространстве, ограниченном наплавляемой сутункой и формирующими поверхностями, создается ванна расплавленного флюса, в который вводится плавящийся электрод (рис. 4). Электрод и наплавляемая сутунка подключаются к различным полюсам источника питания. Электрический ток протекает между электродом и наплавляемой сутункой через ванну расплавленного флюса. Расплавленный металл электрода стекает через флюс в металлическую ванну, образуя наплавленный слой.

Применение высокотемпературной пайки позволяет сформировать на поверхности заготовки износостойкий плакирующий слой методом контактной термодиффузионной пропитки. В зазор между деталью и формой засыпают смесь порошка износостойкой составляющей (карбиды вольфрама, бора, титана) и самофлюсующегося сплава-связки (припоя) – мельхиора МНМц74-13-13 в соотношении 5:1. Форму загружают в печь вертикально и нагревают до температуры, превышающей температуру плавления сплава–связки, затем выдерживают в течение времени, необходимого для смачивания и пропитки износостойкой составляющей. Расплав припоя диспергирует в процессе выдержки в частицы наполнителя и частично растворяет их. Температура ликвидуса расплава повышается и может происходить ее изотермическая кристаллизация.

Заливку вкладышей подшипников скольжения осуществляют сплавами – баббитами, марок Б88, Б83, БН и другими с температурой плавления 400...500 °С [5].

Баббитами называются антифрикционные сплавы на оловянной и свинцовой основах. Структура баббита состоит из пластичной основы с вкрапленными в нее частицами твердой составляющей, равномерно распределенной в относительно мягкой основе. В оловянистых баббитах пластичной основой является твердый раствор сурьмы и меди в олове, в свинцовистых – сурьмянисто-оловянно-свинцовая эвтектика. Такие же сплавы составляют основу оловянно-свинцовых припоев, хорошо взаимодействующих со сталью.

Твердые частицы, распределенные в основе баббита, являются химическими соединениями олова с сурьмой, меди с оловом, меди с сурьмой. Такое строение баббита обеспечивает опору вала на твердые

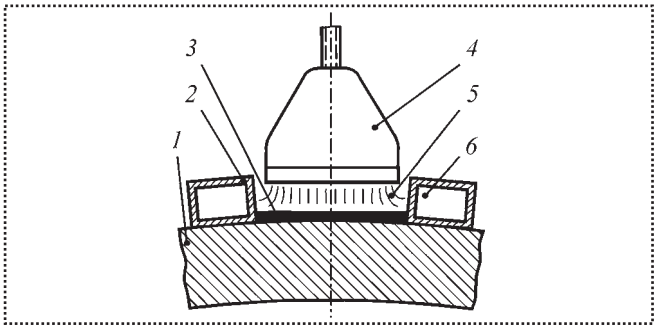


Рис. 5. Схема газопламенной наплавки баббита на наружную поверхность изделия:
1 – наплавляемая деталь; *2* – водоохлаждаемый ограничитель; *3* – расплавленный баббит; *4* – щелевая горелка; *5* – пламя горелки; *6* – проточная вода

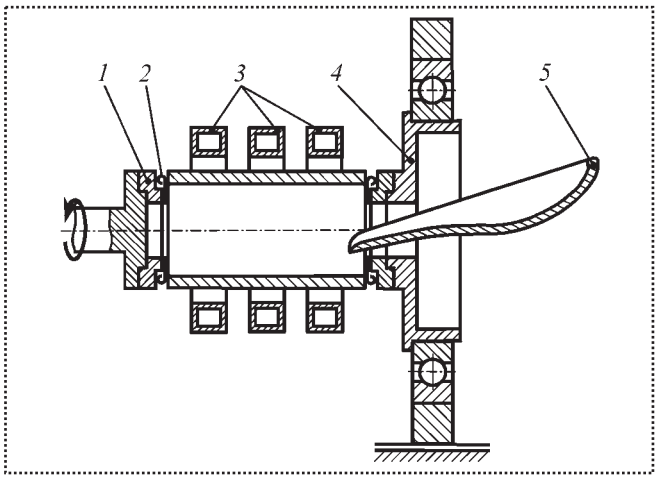


Рис. 6. Схема заливки баббитом вкладыша подшипника скольжения:
1 – чугунные защитные кольца; *2* – стальные завальцованные крышки; *3* – индуктор; *4* – полый центр; *5* – заливочный лоток

включения, что обеспечивает малый коэффициент трения и устраняет вероятность схватывания с валом.

Простым способом нанесения баббитового слоя на рабочую поверхность вкладыша является его наплавка с использованием газопламенной горелки путем послойного нанесения расплава, полученного в струе водородного пламени, на поверхность изделия (рис. 5). Такой способ эффективен в индивидуальном и мелкосерийном производстве.

Широкое распространение получил центробежный способ заливки подшипников скольжения (рис. 6). При центробежном способе заливки происходит значительное уплотнение сплава под действием центробежных сил. При индукционном нагреве вращающегося вкладыша можно использовать наплавляемый металл в твердом состоянии (в виде шихты).

Кроме баббитов для заливки вкладышей подшипников применяют свинцовые бронзы – БрС30 и другие свинцовые сплавы, а также алюминиевые сплавы, которые также обладают свойствами припоя.

Термины "заливка" и "наплавка" также не отражают процесс образования паяного соединения вкладыша с абразивным слоем. Эти термины обозначают операции производственного процесса изготовления подшипников скольжения. В источнике [8] отмечается, что "напайку слоя оловянистых баббитов на стальную основу подшипников необоснованно относят к процессу наплавки (наращивание слоя жидкого металла выше температуры солидуса стали), тогда как температура наращиваемого баббита значительно ниже температуры солидуса стали и процесс по существу является напайкой".

Процесс пайки протекает при жидкофазном способе нанесения на стальные изделия защитных металлических покрытий – цинка или алюминия. При цинковании стальное изделие с подготовленной поверхностью погружается в ванну с расплавом цинка, где в результате атомного взаимодействия твердого металла и расплава цинка происходит образование на границе взаимодействия железоцинковых фаз. На этом участке одновременно протекают два процесса: химическая реакция с образованием интерметаллидных слоев в стали и расплаве, и взаимная диффузия через эти слои атомов железа и цинка. Поэтому общая скорость роста толщины покрытия определяется диффузией железа твердого металла в расплав цинка и цинка из его расплава в твердый металл через возникшие интерметаллические слои. Так как скорость диффузии атомов железа и цинка в отдельных слоях неодинакова, образующееся покрытие на границе соединения состоит из фаз различной толщины. Внешняя часть покрытия состоит из чистого цинка [14].

В соответствии с закономерностями процесса пайки вероятность образования тех или иных слоев железоцинковых соединений в покрытии во многом зависит от режима цинкования, состава и строения твердого металла, от состава расплава цинка. Толщина покрытия зависит от продолжительности цинкования, температуры расплава цинка и его состава, от скорости извлечения детали из расплава цинка.

Последовательное расположение железоцинковых фаз в покрытии находится в точном соответствии с диаграммой состояния системы металл–железо по линии температуры цинкования.

С целью предотвращения образования хрупких интерметаллидных структур при большой скорости процесса цинкования в расплав цинка вносят небольшое количество алюминия (0,1...0,3 %).

Подобный химический и растворно-диффузионный процесс протекает при горячем алюминировании стальных изделий в расплаве жидкого алюминия [15]. При соприкосновении стали с расплавом алюминия происходит взаимная диффузия металлов с образованием интерметаллидных соединений. Образующиеся в стали кристаллы интерметаллидов растут в глубину стали, образуя зону столбчатых кристаллов в сторону стали, при этом интерметаллиды, образующиеся в расплаве алюминия, могут растворяться в нем.

Таким образом, искусственное ограничение понятия пайки, приведенное в ГОСТе, привело к обособлению производства биметаллов от паяльного производства, несмотря на то, что разработка и развитие биметаллов производится с применением теории пайки. Процесс пайки, т.е. процесс атомного взаимодействия между твердым и жидким металлами при

производстве биметаллов именуется "сваркой" или имеет другие произвольные наименования.

Производство биметаллов показывает уникальные возможности процесса пайки как бы без припоя, а также по совмещению процесса пайки с формированием одного из элементов конструкции из жидкого состояния. Разработчики в паяльном производстве показывают, что процесс пайки сыграл важную роль в создании монолитных металлоконструкций в прошлом, и способен обеспечивать возрастающие потребности промышленного производства в монолитных конструкциях в будущем.

В настоящее время сложилась ситуация, при которой разработчики биметаллических конструкций оставляют без внимания современные достижения в теории и практике паяльного производства. Разработчики-паяльщики оставляют без внимания уникальные возможности процесса пайки, использованные при производстве биметаллов.

Актуальным и современным является заключение, данное в одной из последних публикаций [2] по производству биметаллов: "Для разработки технологии получения сварных соединений из разнородных металлов необходимо детальное изучение процессов взаимодействия твердого тугоплавкого металла с жидкой сталью, определение механизма растворения, диффузии тугоплавкого металла в сталь и компонентов стали в тугоплавкий металл, а также температурно-временные условия образования прослойки интерметаллических соединений на границе раздела". Вопросами атомного взаимодействия твердого и жидкого металлов и занимается наука о пайке. Признание процесса получения биметаллов как паяльного производства позволит расширить научную базу пайки, повысить эффективность исследований и разработок в области создания паяных соединений.

Библиографический список

1. **Батышев А.И.** Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. М.: Металлургия, 1990.

2. **Будкин Ю.В.** Получение сварных соединений из разнородных металлов // Сварочное производство. 2010. № 1.

3. **Вайнерман А.Е.** Разработка теоретических основ прогрессивной технологии наплавки медных сплавов на сталь и бронзы. Дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1981.

4. **Городецкий А.Ш.** Плакирование высокотемпературным припоем тонколистовой стали: сборник "Пайка и ее роль в повышении качества продукции и эффективности производства". М.: МДНТП, 1976.

5. **Дмитров Л.Н.** Биметаллы. Пермь, 1991.

6. **Дудко Д.А., Максимович Б.И.** Наплавка намораживанием из расплава. Киев: Наукова думка, 1968.

7. **Лакедемонский А.В.** Биметаллические отливки. М.: Металлургия. 1964.

8. **Лашко Н.Ф., Лашко С.В.** Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия, 1977.

9. **Литье** биметаллических изделий. ИПЛ АН УССР. Киев, 1976.

10. **Малевский Ю.Б., Несмих В.Г.** Сварка давлением бронзы со сталью. М.: Металлургия, 1981.

11. **Малевский Ю.Б., Несмих В.Г.** Сварка в твердо-жидком состоянии // Автоматическая сварка. 1972. № 8.

12. **Пайка** сталей чугунами / Л.Л. Гржимальский и др. // Сварочное производство. 1986. № 3.

13. **Петрунин И.Е.** Физико-химические процессы при пайке. М.: Машиностроение, 1972.

14. **Проскуркин Е.В., Попович Е.А., Мороз А.Т.** Цинкование: справ. изд. М.: Металлургия, 1988.

15. **Рябов В.Р.** Алитирование стали. М.: Металлургия, 1973.

16. **Справочник** по пайке / Под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003.

УДК 693.814.25 (045)

Я. Семйон, Р. Янош, М. Гайдук, М. Вархола, М. Вагаш, В. Балаж
(Технический университет, г. Кошице, Словакия)
E-mail: jan.semjon@tuke.sk

Модульный принцип проектирования сварочных приспособлений для роботизированных ячеек*

Представлена методика проектирования сварочных приспособлений для роботизированных ячеек, основанная на модульном принципе. Предлагаемая методика учитывает параметры элементов свариваемой детали, типы применяемых роботов и траектории сварных швов. Конструкция реконфигурируемых приспособлений основана на идее создания совместимых модулей разных размерных и функциональных классов. Соответствующая конструкция приспособления, соответствие расположения элементов свариваемой детали и хороший доступ к местам сварки тестируется программой симуляции сварки.

A method of designing devices for robotic welding cells, based on a modular principle. The proposed method takes into account the parameters of elements of the workpiece, the types of robots used and the trajectories of the welds. Structural design of reconfigurable fixture is based on idea of setting compatible modules with different dimensional and functional scale. Correctness of fixture design, positioning of the weldments in it and of the weld head of the robot for execution of the welds is tested in simulation program.

Ключевые слова: приспособление, сварка, робот, модульность.

Keywords: fixture, welding, robot, modularity.

Введение

Сварочные приспособления обеспечивают точную установку и зажим свариваемых деталей. Сварочные приспособления для роботизированных ячеек должны обеспечивать высокую точность и быструю смену свариваемых деталей, а также хороший доступ сварочной горелки к местам сварки. Возможность быстрой смены свариваемых деталей (вручную или автоматически) является очень важной, особенно при точечной сварке, при которой в некоторых случаях время сварки меньше, чем время манипуляции со сварочной деталью. В настоящее время фирмы, использующие сварочные приспособления, должны выполнять все более важные требования заказчиков и очень быстро осуществлять инновации производственного процесса. По этой причине особенно необходимо применять сварочные приспособления, позволяющие производить быструю и совместимую замену их отдельных элементов. Это можно решить применением элементов модульной конструкции в сварочных приспособлениях.

Проектирование основных модулей сварочных приспособлений

Рассматриваемые сварочные приспособления являются периферийным оборудованием роботизированных ячеек, управляемых системой управления робота или центральной управляющей системой, которая автоматически управляет действием зажимных элементов приспособления на основе информации от датчиков. Сварочное приспособление может быть расположено неподвижно или на подходящем кантователе для установки одной или нескольких координат, что позволяет обеспечить лучший доступ к местам сварки.

Конструкция сварочных приспособлений зависит от многих факторов: числа, размеров и массы свариваемых деталей; типа робота; размеров рабочего пространства; типа сварки (точечная, дуговая, лазерная); продолжительности рабочего цикла, подачи и снятия сварочной детали; финансирования и др. На основе приведенных и других специфических параметров и данных можно спроектировать подходящий тип сварочного приспособления.

К основным частям сварочного приспособления можно отнести (рис. 1):

- корпусные рамы и плиты;
- горизонтальные и вертикальные корпусные детали;
- установочные (базовые) элементы;
- узлы зажима.

Главной задачей при проектировании приспособлений модульного типа является определение основ-

* Статья является результатом реализации проекта: "Исследование модулей для интеллектуальных робототехнических систем (ITMS:26220220141), мероприятия 1.3" при финансовой поддержке Европейского фонда регионального развития.

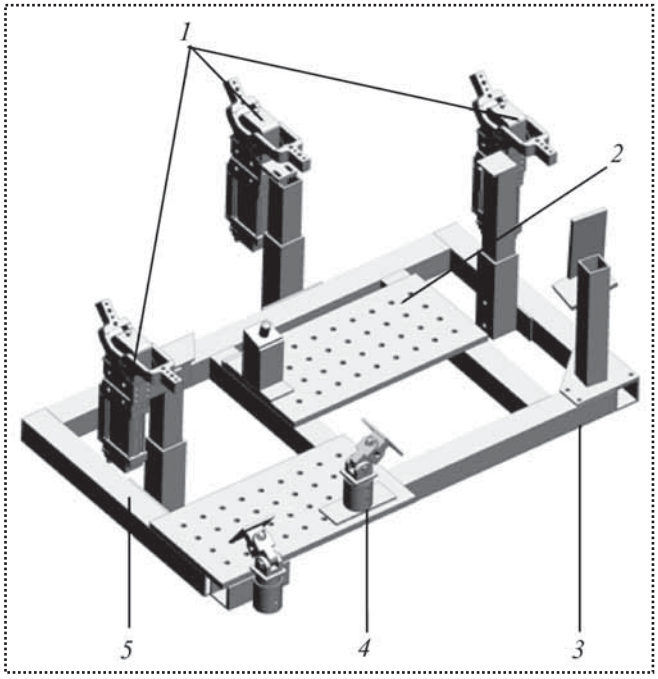


Рис. 1. Модель сварочного приспособления:
1 – узлы зажима; *2* – корпусная плита; *3* – вертикальный корпусный элемент; *4* – установочный элемент; *5* – горизонтальный корпусный элемент

ных модулей отдельных частей приспособления и их типоразмеров. Важным является также выбор способа ускоренного монтажа и демонтажа приспособлений.

Методика проектирования сварочного приспособления для роботизированных ячеек

Отдельные предложенные модули, а также стандартные элементы сварочных приспособлений представлены в САПР – системе автоматизированного проектирования (CAD системе) "Pro Engineer wildfire" в качестве 3D моделей, использующих ассоциативность и размерность рабочего пространства. Для отдельных типов модулей использована функция "Relations and family table", позволяющая обеспечить между ними совместимость, необходимую для простого и ускоренного создания аналогичных модулей. Методическая последовательность проектирования сварочных модульных приспособлений приведена на рис. 2.

Процесс изготовления сварочного приспособления включает в себя следующую последовательность основных шагов.

1. ***Определение последовательности установки отдельных элементов свариваемой детали в приспособлении.*** На основе входных параметров отдельных элементов свариваемой детали определяют последова-

Рис. 2. Методологическая последовательность при проектировании сварочного приспособления

тельность их установки в приспособлении. На рис. 3 показаны отдельные элементы свариваемой детали. Места и последовательность установки отдельных

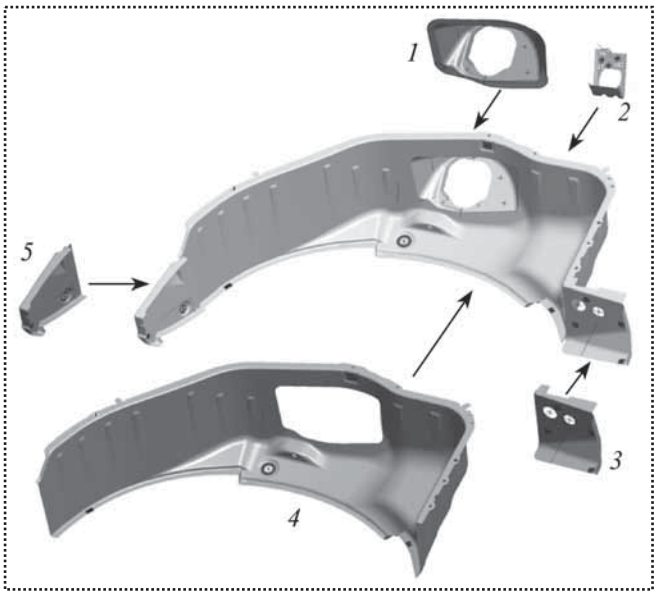


Рис. 3. Элементы свариваемой детали

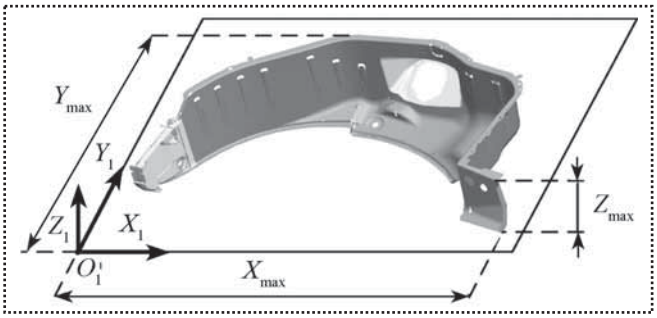


Рис. 4. Расположение элементов свариваемых деталей

Рис. 5. Выбор установочных точек и точек зажима

элементов в приспособлении показана стрелками и цифрами.

В результате данного анализа определяют размеры приспособления (максимальную длину, максимальную высоту и т.д.), а также выбирают подходящий доступ робота к свариваемой детали (рис. 4). Определяют нижнюю и верхнюю точки свариваемой детали, на основе чего можно определить нижнюю и верхнюю точки приспособления (высоту приспособления + опоры + установочные элементы). Между свариваемой деталью и корпусом приспособления соблюдают минимальное расстояние 100 мм, позволяющее по необходимости ввести опору под свариваемую деталь.

2. ***Выбор расположения элементов свариваемой детали, установочных точек и точек зажима.*** На этом

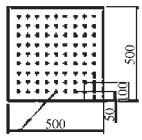
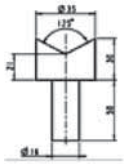
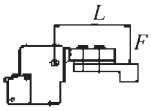
Типы модулей	Размеры	2D чертеж	3D модель
Корпусная плита	H_{min} = 250 мм, H_{max} = 1 500 мм; L_{min} = 500 мм, L_{max} = 2 500 мм		
Корпусные элементы	H_{min} = 60 мм, H_{max} = 100 мм; L_{min} = 200 мм, L_{max} = 2000 мм		
Установочные элементы	D_{min} = 35 мм, D_{max} = 100 мм; L_{min} = 50 мм, L_{max} = 300 мм		
Узлы зажима, консоль	L_{min} = 50 мм, L_{max} = 250 мм; F_{min} = 2000 Н, F_{max} = 30 000 Н		

Рис. 6. Пример модулей для проектирования приспособлений

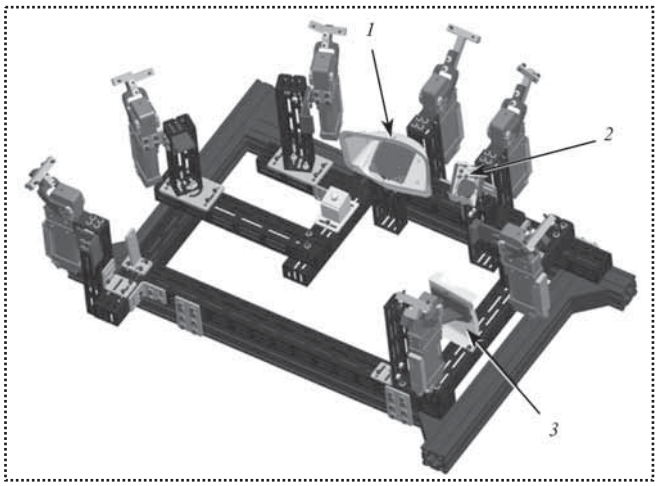


Рис. 7. Расположение трех элементов свариваемой детали в приспособлении

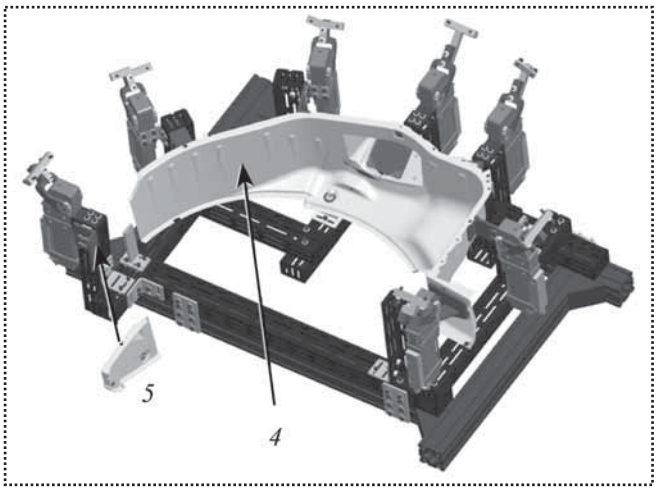


Рис. 8. Установка четвертого и пятого элемента свариваемой детали в приспособлении

этапе предварительно определяют точки для установки отдельных элементов свариваемой детали. Далее определяют точки зажима, необходимые усилия зажима и возможное расположение несущих элементов, датчиков и узлов зажима (рис. 5).

3. ***Выбор отдельных модулей приспособления.*** На данном этапе выбирают отдельные типы составных элементов из базы данных, причем для этого используют интерактивные методы. Выбранные модули должны быть взаимно совместимы, что обеспечивается подходящими связями и соотношениями с помощью программы Microsoft Office Access 2003. Результатом является набор подходящих модулей, которые можно использовать для проектирования приспособления (рис. 6). Для сравнения совместимости отдельных составных элементов используют вспомогательные таблицы, позволяющие взаимно подобрать подходящие типы модулей.

4. ***Проектирование приспособления.*** Проектирование приспособления осуществляют в CAD-системе с использованием 3D моделей отдельных модулей (рис. 7, 8 и 9). Выбирают определенный элемент на основе взаимной размерной и функциональной совместимости. Приспособление на этом этапе тестируют с целью достижения необходимой точности, в режиме 3D проверяют доступ к местам сварки. Также определяют оптимальное расположение горелок. На рис. 7 показано сварочное приспособление, в котором установлены три элемента свариваемой детали (*1*, *2* и *3*).

После установки трех элементов свариваемой детали в приспособлении устанавливают самый большой элемент *4*, к которому присоединяют последний элемент *5* (рис. 8).

После установки всех свариваемых элементов в приспособлении и проверке их расположения осуществляют зажим и создают жесткую составную деталь.

5. **Определение взаимного положения пары "робот–приспособление".** На основе предыдущих требований определяют подходящий тип робота. На 3D модели робота проверяют максимальные размеры перемещений в направлении отдельных координат. В случае необходимости выбирают (или проектируют) станины для робота. На последующем этапе контролируют присоединения выбранного типа горелки или определяют соответствующие соединяющие элементы. Это необходимо выполнить для обеспечения доступа ко всем местам сварки. Последним шагом является определение исходного положения робота в пространстве для обеспечения простой и безопасной установки и замены свариваемых деталей (рис. 10).

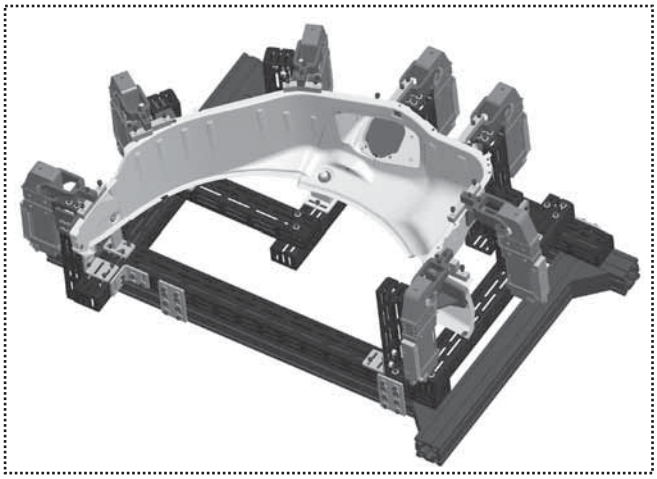


Рис. 9. Общий вид сварочного приспособления

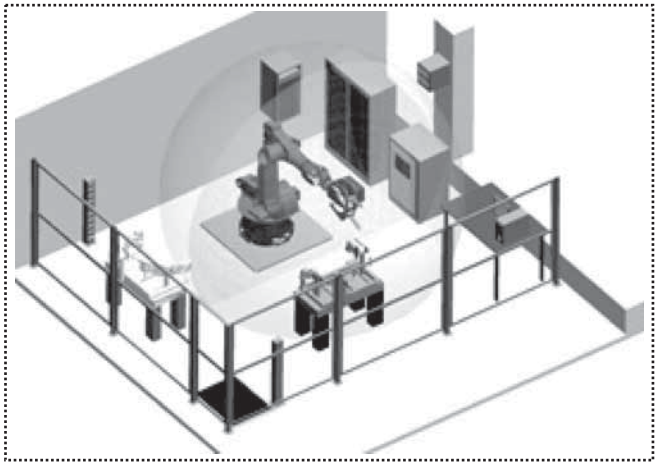


Рис. 10. Определение относительного расположения пары "робот–приспособление"

6. ***Off-line подготовка программы для робота.*** Если выполнены все предыдущие требования, можно подготовить программу для управления роботом. Программа должна представлять собой любую имитационную программу, совместимую с выбранным роботом и позволяющую работать с импортированными файлами. Например, в RobCAD, AlmaCam, RobotStudio можно осуществлять симуляцию движения в направлении всех координат робота, проверять коллизии или выполнять оптимизацию для сокращения непроизводительного времени. Созданную программу необходимо ввести в управляющую систему робота и выполнить ее проверку.

Заключение

Главной целью является повышение производительности сварочных роботизированных ячеек. Этого можно достигнуть, используя принципы модульного построения и реконфигурированности. Таким способом сокращается время, необходимое для проектирования сварочных приспособлений роботизированных ячеек для точечной или дуговой сварки. Приведенная методика изображена в блок-схеме (см. рис. 2), которая показывает последовательность проектирования сварочного приспособления использованием взаимно соответствующих модулей. Использование методики и ее проверка приведены на примере сварочного приспособления роботизированного участка для точечной сварки внутреннего заднего крыла автомобиля класса SUV.

Библиографический список

1. **Chan K., Banhabit B., Dai M.** Reconfigurable fixturing system for robotic assembly // Manufacturing systems. 1992. № 3.

2. **Hajduk M., Semjon J., Vagš M.** Design of the welding fixture for the robotic station for spot welding based on the modular concept // Acta Mechanica Slovaca. 2009. № 4. P. 30–36.

3. **Baláž V., Hajduk M., Páchniková L.** Information system structures for flexible production cell // Machinary, technology, materials: 7 International Congres, Sofia, Bulgaria. 2010. P. 146–147.

4. **Kang Y., Rong Y., Yang J.C.** Computer aided fixture design verification. part 1. The framework and modeling // International journal of advanced manufacturing technology. Vol. 21. 2006.

5. **Vagaš M., Semjon J., Hajduk M., Páchniková L., Lipčák M.** The view to the current state of robotics // Optirob, 2011, Romania / Singapore. Vol. 8. P. 205–209.

ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ

в рубрике "Сборочно-сварочные работы. Пайка"

Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка как вспомогательный процесс

УДК 621.382

В.Д. Шашурин, *д-р техн. наук,* **Н.А. Ветрова,**
С.А. Мешков, *канд-ты техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: natasha_vetrova@mail.ru

Обеспечение надежности смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах на этапе их сборки

Решена проблема обеспечения заданного уровня надежности современных смесителей радиосигналов СВЧ диапазона на резонансно-туннельных диодах (РТД). Показано, что достижение значений показателей надежности, требуемых для областей применения с высокой ценой отказа изделия, возможно благодаря введению контрольно-диагностической операции термотестирования смесителей радиосигналов на этапе их сборки.

The problem of providing a given level of reliability of modern mixers microwave radio signals to a resonant-tunneling diodes (RTD) has been solved. Here is shown that achievement of the values of reliability required for applications with a high price out products made possible by the introduction of control and diagnostic operations termotestirovaniya mixers radio during their assembly.

Ключевые слова: технология сборки, нанотехнология, наноприбор, надежность, смеситель радиосигналов, резонансно-туннельный диод.

Keywords: nanotechnology, nanoinstrument, reliability, mixer of radio signals, resonant tunneling diode.

Тенденции развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) связи определяют необходимость реализации таких требований, как миниатюризация и повышение технических характеристик РЭС (уменьшение потерь преобразования, увеличение динамического диапазона, уменьшение искажений сигналов, расширение диапазона рабочих частот и т.д.). При этом остаются неизменными требования повышения показателей их надежности.

В состав большинства РЭС в качестве отдельных функциональных модулей входят смесители радиосигналов. В таких устройствах, построенных по схеме с преобразованием частоты, именно смесители вносят основной вклад в чувствительность, устойчивость от помех и искажения обрабатываемых сигналов, а следовательно, и в надежность всей системы.

Основным элементом смесителя радиосигнала, определяющим его технические характеристики, является нелинейный элемент (диод или транзистор). Для выполнения перечисленных требований, стоящих перед современными РЭС связи СВЧ диапазона, перспективным является использование полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов. К таким приборам относится резонансно-туннельный диод (РТД) с поперечным токопереносом на базе многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур (РТС). Для улучшения эксплуатационных характеристик нелинейного преобразователя возможно создание РТД с необходимой формой вольтамперной характеристики (ВАХ), позволяющей уменьшить интермодуляционные составляющие частот гетеродина и сигнала в спектре выходного сигнала [3].

Одной из основных проблем, сдерживающих широкое применение указанных изделий в различных радиоэлектронных системах, состоит в недостаточном уровне их надежности (гамма-процентная наработка $T_{\gamma=0,9999}$ = 3...4 года) [3]. Введение операции термотестирования диодов смесителя с последующей их селекцией позволяет данными технологическими методами повысить значения $T_{\gamma=0,9999}$ до 9 лет [1]. Это недостаточно для радиоэлектронных средств, используемых в тех областях приборостроения, где цена отказа чрезвычайно велика. Так для космической отрасли необходимы смесители радиосигналов с $T_{\gamma=0,9999} \approx$ $\approx$ 13...15 лет.

Задача достижения заданных показателей надежности для данной группы изделий может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на выявлении причинно-следственных связей факторов, определяющих формирование отказов смесителей и учитывающих конструкторско-технологические особенности их производства. В конечном итоге это позволит разработать инженерные методики и связанные с ними технологические мероприятия для расчетно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений, позволяющих повысить надежность и обеспечить

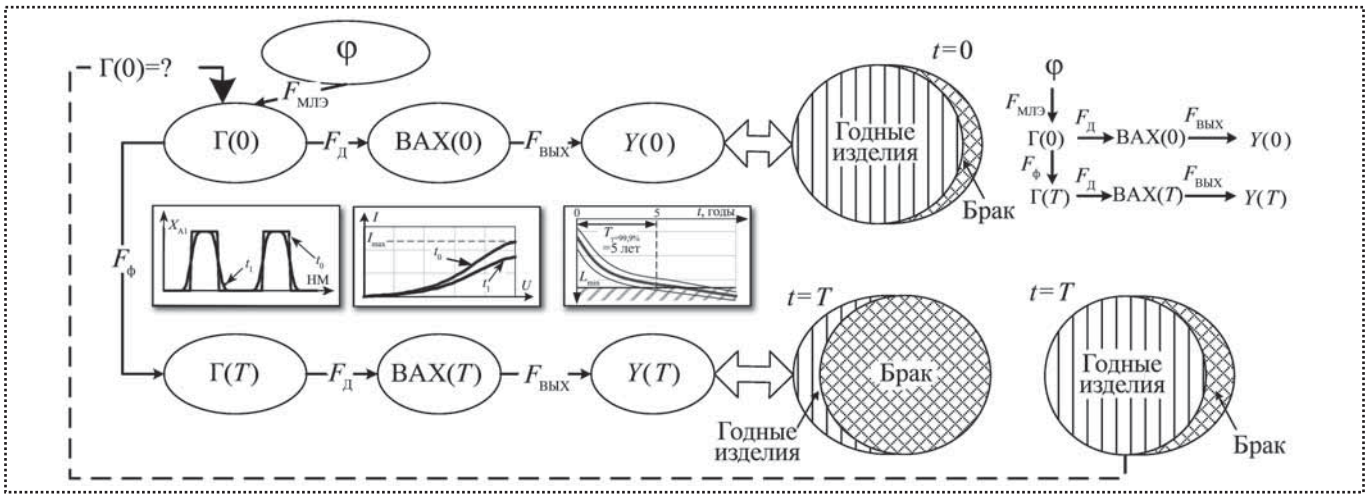


Рис. 1. Структурная схема формирования эксплуатационных параметров См РТД СВЧ с учетом деградационных процессов

требуемые для смесителей радиосигналов спецназначения показатели надежности на этапе их сборки.

Между тем, имеющиеся на сегодняшний день результаты исследований показали, что "слабым местом" с точки зрения надежности смесителя является РТД. Установлено, что доля отказов пассивных элементов смесителя мала, а доминируют постепенные отказы РТД, обусловленные деградационными процессами в РТС. Интенсивность данного процесса зависит от характеристик гетероструктуры и от технологии ее изготовления, информация о которых является неполной.

Для выявления причинно-следственных факторов, определяющих постепенные отказы, разработана структурная схема формирования эксплуатационных параметров смесителя на базе РТД СВЧ диапазона (См РТД СВЧ) с учетом деградационных процессов, обусловленных диффузионными явлениями в РТС РТД, и конструкторско-технологических особенностей производства изделия (рис. 1). На этом рисунке приняты следующие обозначения: φ – пространство возможных параметров РТС; Г(0) – параметры РТС в момент времени $t = 0$; ВАХ(0) – вольтамперная характеристика диода в момент времени $t = 0$; $Y(0)$ – выходные параметры смесителя в момент времени $t = 0$; $F_{МЛЭ}$ – формирование параметров РТД доступными методами эпитаксии; $F_д$ – формирование ВАХ РТД; $F_ф$ – деградация РТС в процессе эксплуатации РТД; $F_{вых}$ – формирование выходных параметров См РТД СВЧ.

Особенность этой схемы состоит в том, что пространство ее "исходов" определяется множеством различных вариантов построения РТС, которая обеспечивает заданные выходные электрические характеристики изделия в целом.

Формализация структурной схемы в виде математической модели позволяет исследовать характер изменения показателей надежности смесителя в зависимости от интенсивности протекания диффузионных процессов в РТС. Системно модель объединяет три расчетных модуля. Модуль 1 предназначен для расчета изменения характеристик РТС РТД в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов. Модуль 2 предназначен для моделирования ВАХ РТД, имеющих в своем составе полупроводниковые гетеростуктуры с различным составом слоев (GaAs, AlGaAs и др.). Модуль 3 предназначен для оценивания изменения электрических параметров смесителя в зависимости от дрейфа ВАХ РТД.

Расчет деградационных процессов в гетероструктуре РТД реализован в программном пакете DiRL, для расчета ВАХ РТД использовался программный продукт VARMA, для расчета выходных электрических параметров смесителя с учетом технологических погрешностей – Microwave Office.

В соответствии с представленной математической моделью было проведено численное моделирование с целью определения характеристик РТС, изменение которых оказывает доминирующее влияние на дрейф ВАХ РТД и, как следствие, на значения выходных электрических параметров смесителя.

В качестве объекта моделирования был выбран типовой балансный смеситель СВЧ диапазона (выходные электрические параметры: потери преобразования $L = 8{,}3$ дБ; коэффициент 1дБ-компрессии $K_{1dB} = -14{,}8$ дБм). РТД реализован на основе гетероструктуры "**А**" (двухбарьерная симметричная GaAs-$Al_xGa_{1-x}As$, концентрация Si в приэлектродных слоях $5{\cdot}10^{18}$ см$^{-3}$, толщины AlAs- и GaAs-слоев, соот-

Таблица 1

Чувствительность выходных электрических параметров См РТД СВЧ к изменению параметров РТС

Наработка, годы	S_L, % (N_b = 5–4)	S_L, % (V_b = 1,0–0,9)	S_L, % (N_w = 9–8)	$S_{K_{1aB}}$, % (N_w = 9–8)
0	–189,0	–13,5	35,4	16,9
0,5	–174,6	–10,7	54,2	15,5
2	–151,7	0,8	39,6	14,5
8,5	–137,8	–0,7	26,1	14,9
15	–127,3	–0,4	31,6	12,3

ветственно составляют $N_b = 5$ и $N_w = 9$ монослоев, молярная доля алюминия x_{Al} в соединении $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ равна 1). Изменяемыми характеристиками гетероструктуры являлись: N_b и N_w и x_{Al}.

Полученные результаты (табл. 1) оценивались коэффициентами чувствительности S_L и S_{K1dB}:

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{\text{исх}}}{\Gamma_{i,new} - \Gamma_{i,\text{исх}}} \cdot \frac{\Gamma_{i,\text{исх}}}{L_{\text{исх}}} \text{ и}$$

$$S_{K_{1dB}} = \frac{K_{1dBnew} - K_{1dB\text{исх}}}{\Gamma_{i,new} - \Gamma_{i,\text{исх}}} \cdot \frac{\Gamma_{i,\text{исх}}}{K_{1dB\text{исх}}},$$

где $L_{\text{исх}}$, L_{new} – потери преобразования смесителя на РТД со структурой "**А**" и на РТС с изменением ее характеристики, соответственно; $K_{1dB\text{исх}}$, K_{1dBnew} – коэффициент 1 дБ-компрессии смесителя на РТД со структурой "**А**" и на РТС с изменением ее характеристики, соответственно; $\Gamma_{i,\text{исх}}$, $\Gamma_{i,new}$ (i = 1, 2, 3) – характеристика (N_b и N_w, или x_{Al}) структуры "**А**" и РТС с изменением ее характеристики, соответственно.

Установлено, что уменьшение номинальных значений N_b и x_{Al} при прочих неизменных характеристиках рассмотренной РТС влечет за собой значительное увеличение L (см. табл. 1), тогда как уменьшение номинальной толщины N_w сопровождается уменьшением номинальных значений L и расширением динамического диапазона (увеличением K_{1dB}). Таким образом, коэффициент чувствительности L и K_{1dB} к уменьшению N_w максимален во всем временном интервале (15 лет), что позволило выбрать толщину GaAs-слоя (N_w) двухбарьерной симметричной GaAs-$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – РТС в качестве управляемого параметра для оптимизации смесителя.

Исследования влияния констукторско-технологических факторов производства смесителя (погрешностей изготовления подложки, микрополосков, направленного ответвителя, сосредоточенных элементов, РТД) на формирование поля рассеяния выходных электрических параметров См РТД СВЧ позволили сделать следующие выводы. Установлено, что поле рассеяния L и K_{1dB} увеличивается при уменьшении толщин слоев РТС. Закон распределения L и K_{1dB} близок к нормальному и остается таковым на всем временном интервале. При этом доминирующее влияние на поле рассеяния L и K_{1dB} оказывают технологические погрешности РТД, определяемые выбранной технологией формирования РТС.

Таким образом, установлено, что возможность повышения надежности См РТД СВЧ лежит в оптимизации характеристик РТС диода и выборе технологической операции формирования РТС диода.

Структуру математической модели конструкторско-технологической оптимизации определяет задача максимизации гамма-процентной наработки партии См РТД СВЧ при заданных конструкторских допусках на выходные параметры смесителя и технологических погрешностях на элементную базу См РТД СВЧ, исходя из вариантности построения РТС и технологии ее формирования:

$$\begin{cases} \max T_\gamma(\overline{\Gamma}, \overline{\Pi}, \overline{\Pi\text{д}}, \overline{\Delta\Gamma}, \overline{\Delta\Pi}, \overline{\Delta\Pi\text{д}}, \overline{\Delta Y_k}); \\ \varphi, \overline{\Delta\Gamma}, \overline{\Delta\Pi}, \overline{\Delta\Pi\text{д}} = \text{const}, \ \overline{Y} \in \overline{\Delta Y_k}, \end{cases}$$

где $T_\gamma(\overline{\Gamma}, \overline{\Pi}, \overline{\Pi\text{д}}, \overline{\Delta\Gamma}, \overline{\Delta\Pi}, \overline{\Delta\Pi\text{д}}, \overline{\Delta Y_k})$ – гамма-процентная наработка до отказа (целевая функция); $\overline{\Gamma}$ – вектор параметров РТС; $\overline{\Pi}$, $\overline{\Pi\text{д}}$ – векторы параметров конструкции (пассивных элементов и подложки, соответственно) См РТД СВЧ; $\overline{\Delta\Pi}, \overline{\Delta\Pi\text{д}}, \overline{\Delta\Gamma}$ – векторы технологических погрешностей соответствующих параметров; $\overline{\Delta Y_k}$ – допуски на электрические параметры $\overline{Y}$ См РТД СВЧ.

При конструкторско-технологической оптимизации балансного смесителя был рассмотрен ряд модификаций базовой гетероструктуры "**А**" РТД (варианты отличаются значениями N_w, обеспечивая при этом требуемую степень полинома ВАХ РТД). Установлено, что постепенный отказ См РТД СВЧ определяется изменением L в процессе эксплуатации, в то время

Таблица 2

Гамма-процентная наработка T_γ (в годах) балансных См СВЧ на РТД с различными РТС

Структура	$\gamma = 0{,}999$	$\gamma = 0{,}9999$
"**A**"	4,04	3,47
"**A1**"=mod**A**–[N_w–1]	6,81	6,08
"**A2**"=mod**A**–[N_w–2]	9,99	9,13
"**A3**"=mod**A**–[N_w–3]	10,62	9,75
"**A4**"=mod**A**–[N_w–4]	10,53	9,94

как K_{1dB} не оказывает влияния на его надежность в пределах исследуемой наработки. Значения T_γ смесителя на основе этих вариантов РТС приведены в табл. 2. Структуры, характеристики которых отличаются значением N_w, обозначены "**A**○"= =mod**A**–[N_w–○], где ○ – количество монослоев GaAs, на котором толщина этого слоя меньше соответствующего слоя структуры "A".

Как следует из приведенных данных, конструкторско-технологическая оптимизация См РТД СВЧ позволила достигнуть высоких значений надежности $T_{\gamma=0{,}9999} \approx 10$ лет. В то же время установлено, что См РТД СВЧ, реализованные на трех различных РТС "**A2**", "**A3**" и "**A4**", имеют близкую по значению T_γ ($T_{\gamma=0{,}9999}$ соответственно равна 9,1; 9,8 и 9,9 лет).

В связи с тем, что переход смесителя в неработоспособное состояние обусловлен постепенным отказом, наблюдается тенденция выделения экспертами в поле допуска электрических параметров См РТД СВЧ областей с различным "качеством" выполнения функций прибором (с различной "вероятностью выполнения рабочих функций" [2]). Поэтому полученные перспективные варианты См РТД СВЧ (реализованные на РТС "**A2**", "**A3**" и "**A4**") были ранжированы по уровню групповой надежности с учетом вероятности выполнения рабочих функций смесителем, полученной методом экспертных оценок (рис. 2). Для обеспечения максимального времени пребывания См РТД СВЧ в области поля допуска с максимальной вероятностью выполнения функций была решена следующая задача:

$$\begin{cases} \max \widetilde{P}_{\text{фп}}(P_{\text{ф}}(\overline{Y}),\ \overline{\Gamma},\ \overline{\Pi},\ \overline{\Pi\text{д}},\ \overline{\Delta\Gamma},\ \overline{\Delta\Pi},\ \overline{\Delta\Pi\text{д}},\ \overline{\Delta Y_k},\ t); \\ \varphi, \overline{\Delta\Gamma},\ \overline{\Delta\Pi},\ \overline{\Delta\Pi\text{д}} = \text{const},\ \ \overline{Y} \in \overline{\Delta Y_k},\ \ P_{\text{ф}}(\overline{Y}) = P_{\text{ф зад}}(\overline{Y}), \end{cases}$$

где $\widetilde{P}_{\text{фп}}(P_{\text{ф}}(\overline{Y}),\ \overline{\Gamma},\ \overline{\Pi},\ \overline{\Pi\text{д}},\ \overline{\Delta\Gamma},\ \overline{\Delta\Pi},\ \overline{\Delta\Pi\text{д}},\ \overline{\Delta Y_k},\ t)$ – интегральная функция качества партии См РТД СВЧ; $P_{\text{ф}}(\overline{Y}) = P_{\text{ф зад}}(\overline{Y})$ – заданная экспертами вероятность выполнения функций См РТД СВЧ (см. рис. 2). Интегральная функция качества партии См РТД СВЧ рассчитывается по формуле

$$\widetilde{P}_{\text{фп}} = \int_0^\infty P_{\text{фп}}(t)dt;$$

$$P_{\text{фп}}(t) = P_{\text{фп}}^{Y_1}(t)P_{\text{фп}}^{Y_2}(t)\ldots P_{\text{фп}}^{Y_i}(t)\ldots P_{\text{фп}}^{Y_n}(t);\ P_{\text{фп}}^{Y_i}(t) = \frac{P_{\text{экв п}}^{Y_i}(t)}{P_n^{Y_i}(t)},$$

где $P_{\text{фп}}(t)$ – интегральная функция качества партии См РТД СВЧ в момент времени t; $P_{\text{фп}}^{Y_i}(t)$ – интегральная функция качества партии См РТД СВЧ в момент времени t по выходному электрическому параметру Y_i; $P_n^{Y_i}(t)$ – вероятность попадания выходного параметра Y_i См РТД СВЧ в момент времени t в допустимые пределы ΔY_{ik} (вертикальная штриховка на рис. 2); $P_{\text{экв п}}^{Y_i}(t)$ – вероятность $P_n^{Y_i}(t)$, скорректированная с учетом $P_{\text{ф}}(Y_i)$ (горизонтальная штриховка на рис. 2).

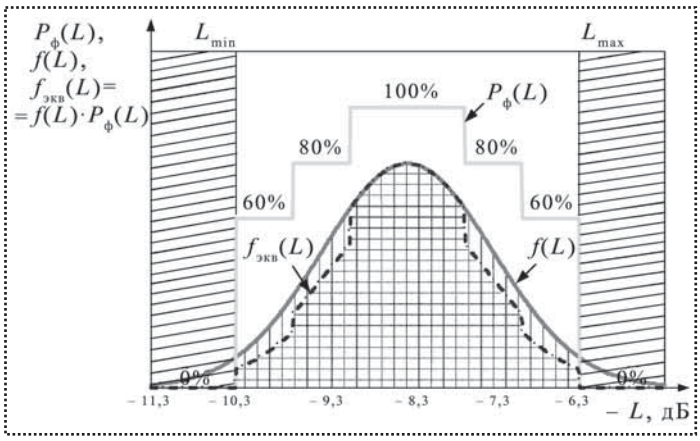


Рис. 2. Определение интегральной вероятности выполнения функций партией См РТД СВЧ по величине L в фиксированный момент времени: площадь, ограниченная кривой $f(L)$ и горизонтальной осью координат представляет собой вероятность $P_{\text{п}}$ попадания величины L в поле допуска, а площадь, ограниченная кривой $f_{\text{экв}}(L)$, – вероятность $P_{\text{экв п}}$, скорректированную с учетом $P_{\text{ф}}(L)$

Как показали проведенные исследования, оптимальным является См РТД СВЧ, реализованный на структуре "**A3**" (табл. 3), так как он характеризуется наиболее продолжительным пребыванием в области 100 %-й вероятности выполнения функций смесителем ($T_{P\text{ф}=100\,\%} \approx 4$ года) и минимальным временем пребывания в области низкой $P_{\text{ф}}$ ($T_{P\text{ф}=60\,\%} \approx 7$ лет), а следовательно, и максимальной – $\widetilde{P}_{\text{фп}}$ (t = 15 лет) = = 11 790 – целевой функции.

Таким образом, результаты математического моделирования позволяют сделать вывод, что за счет

Таблица 3

Интегральная вероятность выполнения функций партий См СВЧ на РТД с различными РТС

Структура	$T_{Pф=100\,\%}$, годы	$T_{Pф=80\,\%}$, годы	$T_{Pф=60\,\%}$, годы	$\tilde{P}_{фп} = \int_0^\infty P_{фп}(t)dt$
А	0,5	1,0	6	4 366 (37,0%)
А1=mod–[N_w–1]	1,3	1,5	7,8	6 468 (54,9%)
А2=mod–[N_w–2]	1,9	2,4	12,5	10 260 (87,1%)
А3=mod–[N_w–3]	4,3	5,3	7,2	11 780 (100%)
А4=mod–[N_w–4]	2,8	5,7	8,3	11 270 (95,6%)

оптимизации характеристик РТС и технологических погрешностей изготовления может быть достигнут достаточно высокий уровень надежности партии См РТД СВЧ ($T_{\gamma=0,9999} \approx 10$ лет). Вместе с тем надо отметить, что достижение более высоких значений надежности ($T_{\gamma=0,9999} > 10$ лет) связано с расширением зоны конструкторско-технологической оптимизации за счет разработки дополнительных технологических контрольно-диагностических мероприятий, направленных на определение индивидуальной надежности смесителей в партии. В частности, как показывают расчеты, уровень надежности $T_{\gamma=0,9999} = 15$ лет, могут обеспечить только 8 % изделий партии См РТД СВЧ, выявить которые можно проведением термотестирования на этапе их сборки.

Экспериментальные исследования (результаты которых приведены на рис. 3) подтверждают повышение надежности благодаря проведению оптимизации См РТД СВЧ и введению операции термотестирования смесителей на этапе их сборки.

Для реализации рассмотренной конструкторско-технологической оптимизации См РТД СВЧ построен алгоритм методики ее выполнения (рис. 4). Структурно методика состоит из двух модулей. Первый модуль позволяет решить задачу достижения максимально возможного или требуемого значения выбранного показателя надежности (T_γ – в случае 100 %-ной вероятности выполнения функций смесителя в пределах допуска на выходные электрические параметры или интегральной функции качества партии См РТД СВЧ – в случае проранжированного экспертами поля допуска выходных электрических параметров смесителя). Входными данными алгоритма являются: заданное значение γ (для задачи максимизации T_γ) или T_γ (для задачи достижения заданного уровня надежности); предельные значения выходных электрических параметров смесителя, а также массив возможных параметров слоев РТС (толщины и состава слоев) РТД, их технологических отклонений соответствующих методов эпитаксии. На выходе, исходя из физических закономерностей старения РТС, получаются конструктивно-технологические характеристики См РТД СВЧ с прогнозом значения T_γ.

Для селекции изделий по группам с заданными показателями надежности (например, превышающими для рассмотренного примера $T_{\gamma=0,99} \approx 11,7$ лет, $T_{\gamma=0,999} \approx 10,6$ лет, $T_{\gamma=0,9999} \approx 9,8$ лет) в технологический процесс производства вводится операция термотестирования (второй модуль методики). Ее задача – непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого См РТД СВЧ в партии и последующая селекция высоконадежных изделий.

В основу термотестирования заложен принцип искусственного старения изделия за счет воздействия температурного фактора (ускоренные испытания). Выбор температурного режима в зависимости от заданного временного диапазона эксплуатации изделия

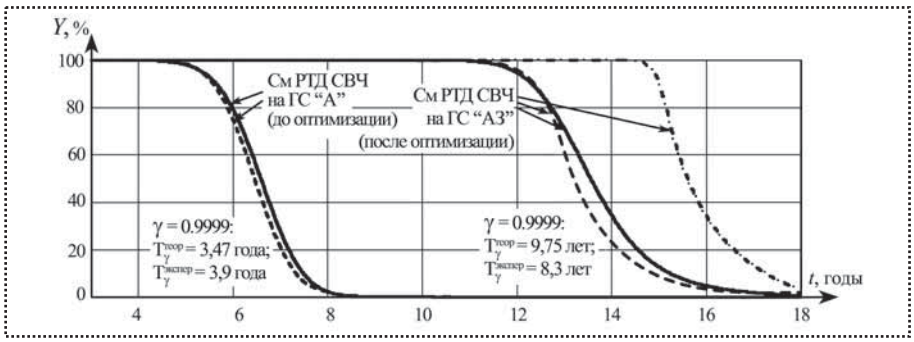


Рис. 3. Вероятность безотказной работы См РТД СВЧ, реализованных на РТС "А" и "А3"

— – теоретическая надежность партии; – – – – экспериментальная надежность партии; –·–·–·– надежность 8 % партии после термотестирования, обеспечивающего $T_{\gamma=99,99\%} = 15$ лет

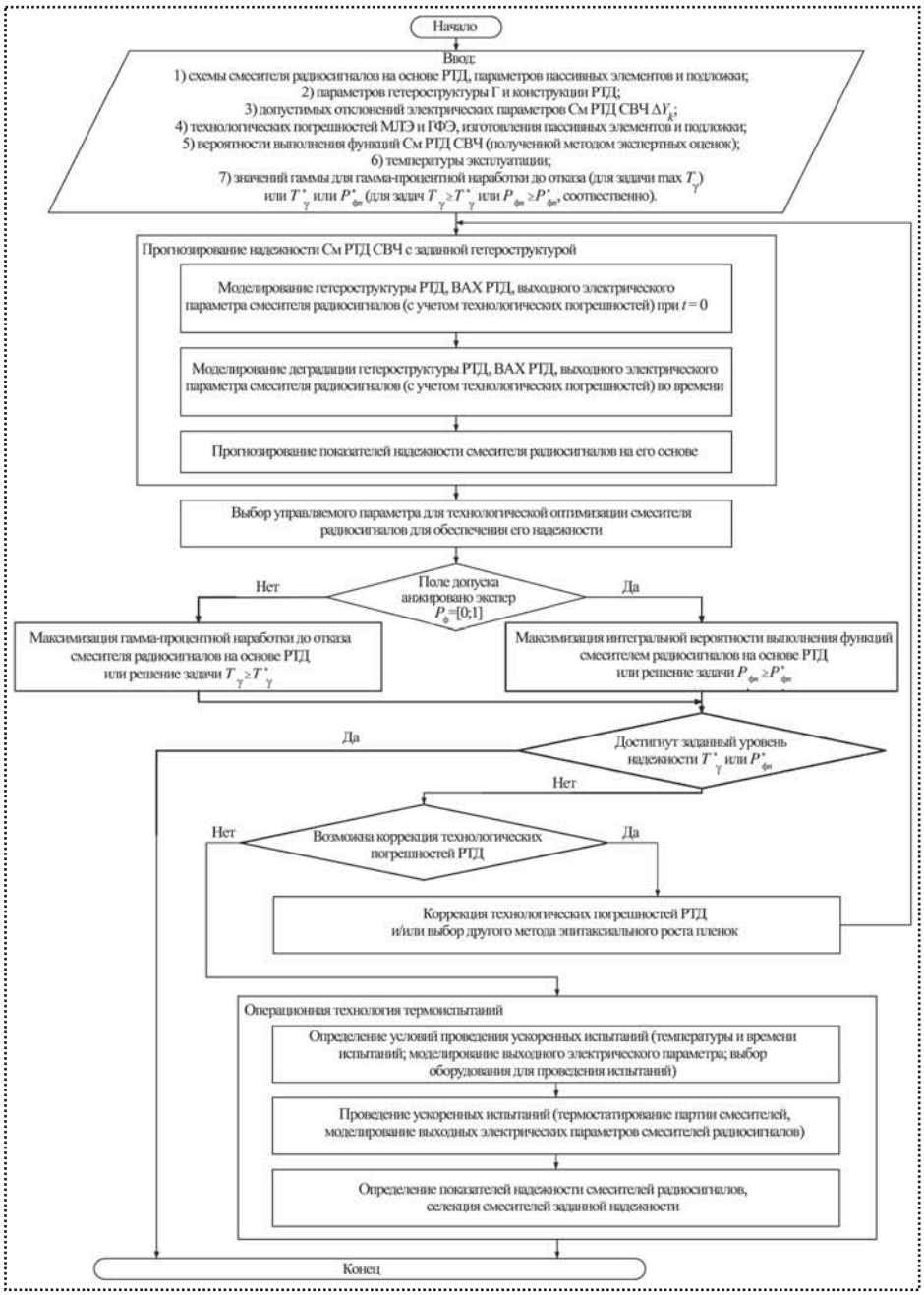


Рис. 4. Методика конструкторско-технологической оптимизации См РТД СВЧ

осуществляется на основе моделирования процессов деградации изделия в диапазоне физически допустимых температур. Испытания при таких температурах инициируют отказы, связанные с высокой энергией активации процесса деградации. При этом режимы технологических испытаний уменьшают ресурс изделия не более чем на 5 %.

Вывод

Реализация разработанной методики обеспечения заданного уровня надежности смесителя СВЧ за счет его конструкторско-технологической оптимизации и введения контрольно-диагностической операции термотестирования на финишном этапе сборки позволяет обеспечить требуемый потребителем уровень надежности изделия авиационно-космического приборостроения.

Библиографический список

1. **Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Шашурин В.Д.** К вопросу о прогнозировании качества смесителей радиосигналов на основе РТД на этапе их сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 4. С. 30–37.

2. **Оценка** показателей качества на этапах проектирования и производства электронных устройств в условиях применения высоких технологий / Ю.П. Ермолаев и др. Казань: Новое знание, 2006. 96 с.

3. **Повышение** показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, В.Ю. Синякин, И.А. Федоренко, Н.В. Федоркова, И.Б. Федоров, В.Д. Шашурин // Наноинженерия в приборостроении. 2011. № 1, с. 34–43; № 2, с. 20–22.

УДК 519.85

Ю.Н. Матросова, *канд. техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)*
E-mail: kandy2701@mail.ru

Программное обеспечение для автоматизированного проектирования фасонных фрез

Представлено разработанное автором программное обеспечение для автоматизированного расчета конструктивных параметров и построения моделей и чертежей фасонных фрез.

Presented by the author developed software for automated calculation of design parameters and construction models and drawings of shaped cutters.

Ключевые слова: программное обеспечение, фасонная фреза, червяк.

Keywords: software, shaped cutter, screw.

В машиностроении на всех этапах жизненного цикла изделий активно внедряются средства автоматизации, ускоряющие процесс изготовления готовой продукции. Это относится к проектированию не только самих изделий машиностроения, но и технологической оснастки и инструмента для их изготовления. Одним из наиболее распространенных методов обработки изделий является фрезерование. При этом часто проектируемым инструментом являются фасонные фрезы – фрезы с фасонной режущей кромкой, которые обрабатывают сложные поверхности с высокой степенью точности и чистоты.

Пальцевые зуборезные фрезы – это концевые фрезы с фасонным профилем режущих кромок, которые применяются в тяжелом машиностроении для нарезания крупномодульных колес (m = 10...50 мм) с прямыми, косыми и шевронными зубьями.

Пальцевые фрезы крепятся консольно с помощью резьбы, с базированием по точно выполненному цилиндрическому пояску на посадочной части шпинделя станка. Винтовая и косозубая шестерни, как и эвольвентный червяк, имеют боковую форму зуба в виде эвольвентной винтовой поверхности. Поверхность вращения, образованная режущими кромками пальцевой фрезы, так же, как и дисковой фрезы, не касается эвольвентной винтовой поверхности по плоской кривой. Пальцевая фреза устанавливается так, чтобы ее ось была строго перпендикулярна и пересекала ось шестерни.

Для расчета координат точек профиля пальцевой фрезы исходными параметрами являются модуль, число зубьев, наружный, внутренний, делительный диаметры косозубой шестерни, торцевой угол, угол наклона зуба на делительной окружности, коэффициент смещения, радиальный зазор, утонение зуба по делительной окружности.

Для построения инструмента рассчитываются диаметр основного цилиндра, половина угловой ширины

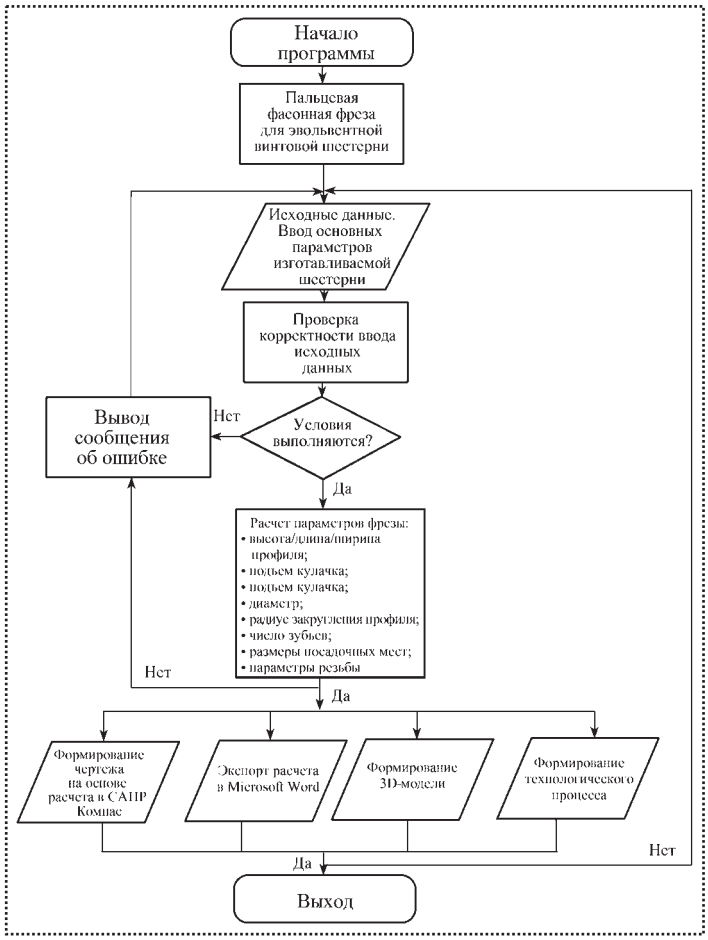


Рис. 1. Алгоритм программы

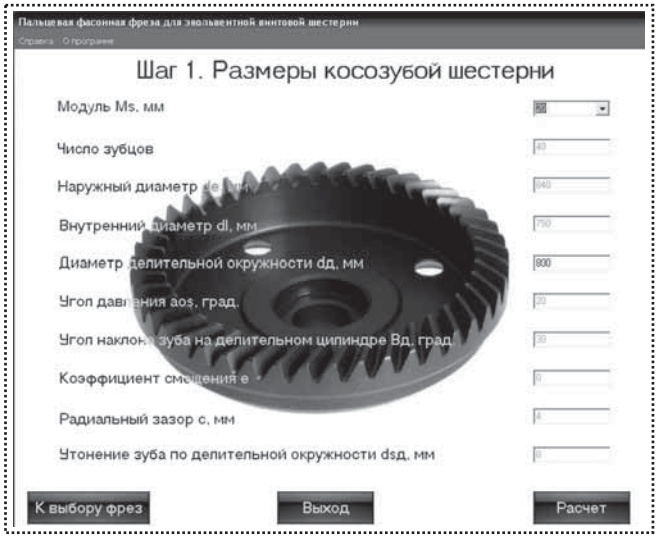


Рис. 2. Главное окно программы

впадины (в радианах) по делительной окружности в торцевой плоскости, угол подъема винтовой линии зуба на основном цилиндре, винтовой параметр, торцевой модуль.

Координаты точек профиля фрезы определяются по параметрическим уравнениям, выраженным через угловой параметр θ, которому дается число значений, равное числу искомых точек профиля. Число точек p_0 профиля берется обычно в пределах от 8 до 15. Задаются конструктивные и габаритные размеры фрез согласно табличным данным.

На основе существующей методики проектирования пальцевых фрез [1] были разработаны алгоритм (рис. 1) и программное обеспечение, позволяющее осуществлять проектирование пальцевых фасонных фрез для эвольвентного профиля.

Реализованное на основе разработанного алгоритма программное обеспечение содержит главное окно (рис. 2), в котором предлагается ввести диаметр и модуль зацепления изготавливаемой шестерни. По этим значениям происходит автоматический расчет других входных параметров. При нажатии на кнопку "Расчет" происходит подбор фрезы из базы данных и выводятся все ее параметры, а при нажатии на кнопки "3D модель" (рис. 3), "2D чертеж" (рис. 4), "Вывод маршрутной карты (МК)", "Экспорт расчета" пользователь сможет вывести всю необходимую документацию по данной фрезе. Построение модели и конструкторского чертежа инструмента, а также формирование технологического маршрута производится автоматически в графической системе САПР КОМПАС-3D.

При нажатии на кнопку "Экспорт расчета" рассчитанные параметры пальцевой фрезы экспортируются в Microsoft Office.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет значительно сократить время кон-

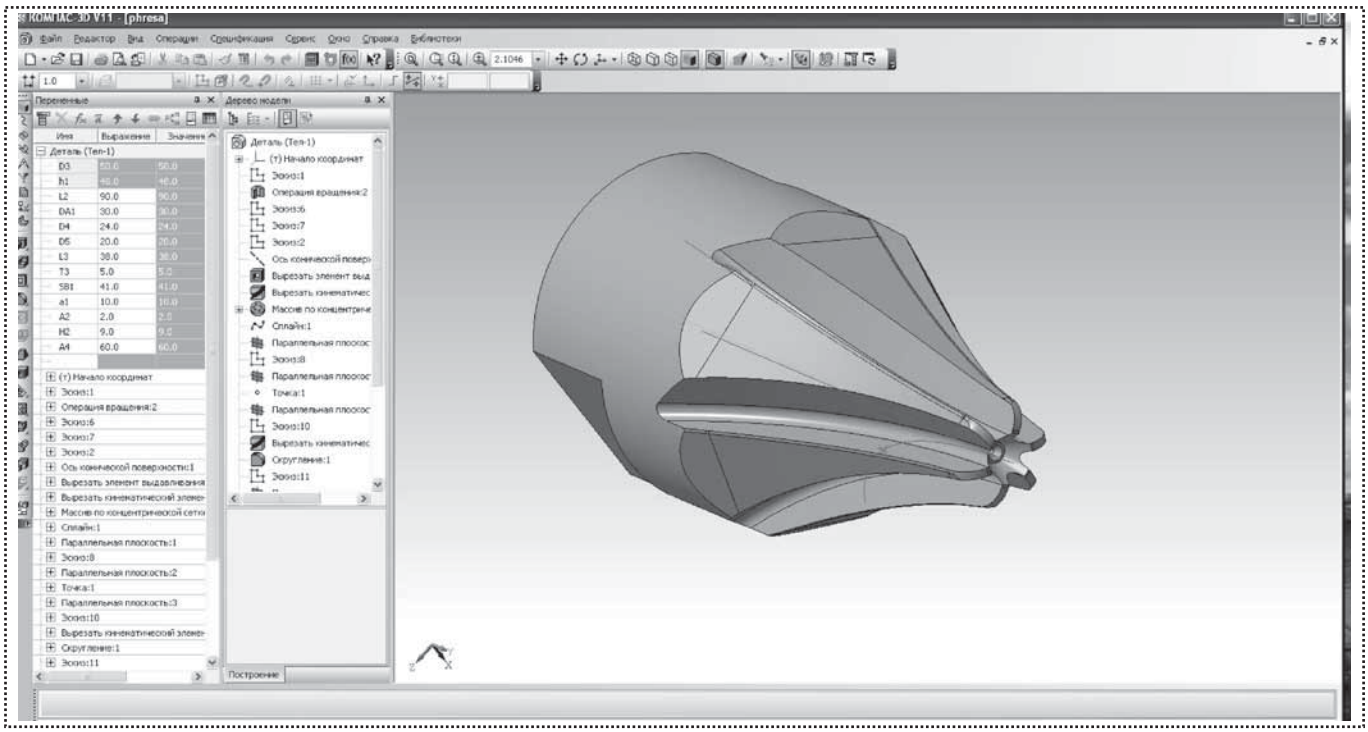


Рис. 3. 3D модель фрезы

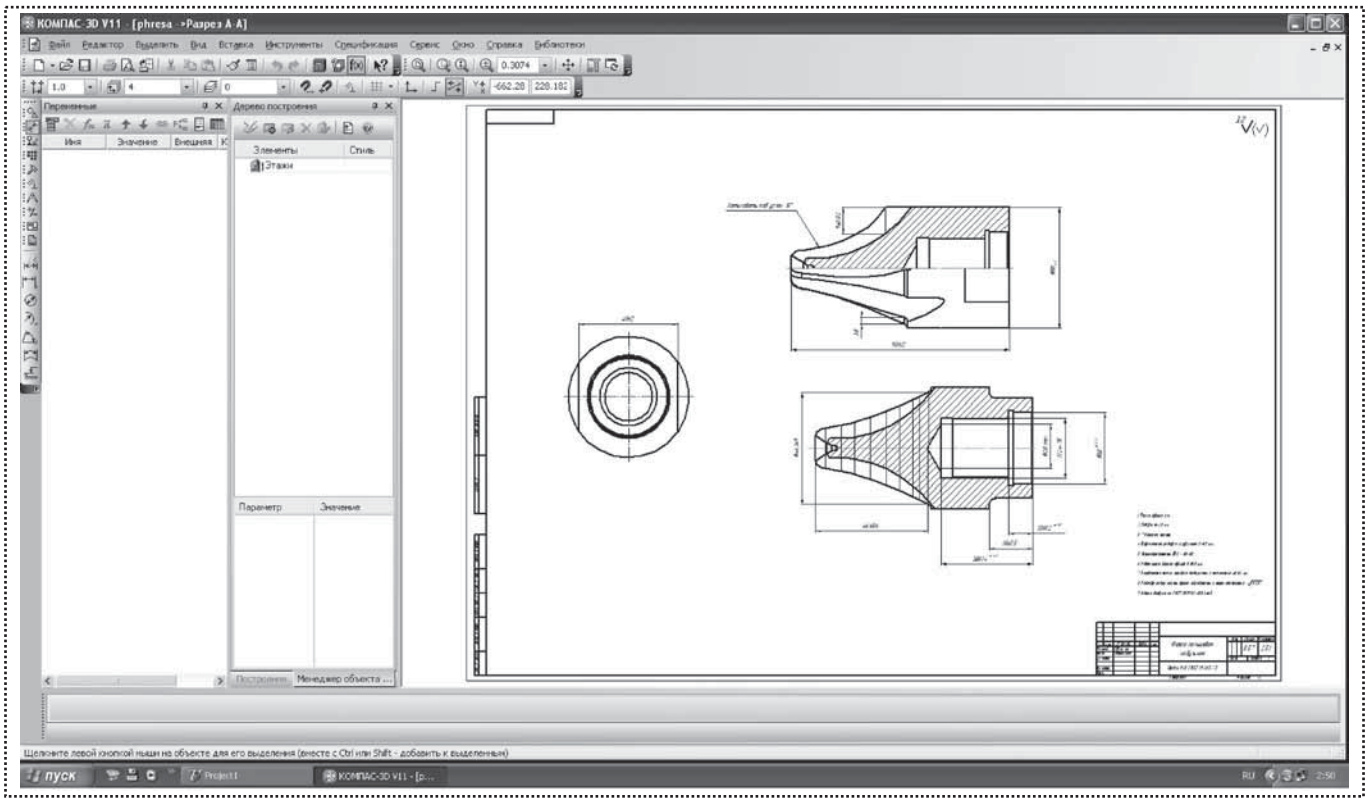


Рис. 4. Чертеж фрезы

структора-инструментальщика и технолога на процесс проектирования фасонных фрез, что значительно снижает себестоимость изделий, для изготовления которых данный инструмент используется.

Библиографический список

1. **Фрайфельд И.А.** Расчет и конструирование специального металлорежущего инструмента. М.-Л., 1959. 196 с.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский 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 11.05.12 г. Подписано в печать 04.07.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,19. 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.