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

2 2015 (175)

СОДЕРЖАНИЕ

Экономика и организация сборочного производства

Долгов В.А., Попов Э.В., Кабанов А.А., Тимерханова Э.Р. Повышение эффективности ремонта и модернизации летательных аппаратов на ОАО "Туполев" путем разработки гибкой информационной модели производственно-технологических решений 3

Технологичность конструкции

Иванов А.А. Оценка технологичности деталей и узлов применительно к автоматической сборке 9

Костенко С.Г. Конструкция и способ сборки планетарного редуктора с арочным зубчато-роликовым зацеплением 14

Хоменко В.В. Методика укрупненной оценки технологической реализуемости инновационных конструкторско-технологических решений, проектов и программ 17

Технологическая оснастка для сборки

Житников Б.Ю., Житников Ю.З., Щеткин А.В. Устройство автоматизированной установки упругих колец во внутренние канавки деталей 23

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка крупных массивных конструкций 25

В помощь конструктору, технологу

Ковязин Р.А., Лагунова Ю.А., Порожский К.П. Анализ бесприводных систем активного охлаждения рабочих жидкостей дебалансных высокочастотных вибраторов для мобильных буровых установок 39

Разное

Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е. Системы обеззараживания ультрафиолетом 44

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) 269-54-98. Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроени и приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИКН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА

М.А. ЕВДОКИМОВ, д.п.н., проф.
Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
В.А. НИКОЛАЕВ, к.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н.
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ

А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА

В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

Украина

КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТРАЖИНСКИЙ, д.т.н.

ПОЛЬША

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

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", 2015

THE MONTHLY
JOURNAL
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

2 2015 (175)

CONTENTS

Economy and the organization of assembly

Dolgov V.A., Popov E.V., Kabanov A.A., Timerkhanova E.R. Efficiency improvement of repair and modernization processes of aerial vehicles at JSC "Tupolev", by developing a flexible information model of production and technological solutions 3

Manufacturability of a construction

Ivanov A.A. The manufacturability evaluation of parts and units applied to automatic assembly 9
Kostenko S.G. Design and way of assembly of a planetary reducer with arch gear and roller gearing 14
Khomenko V.V. Methodology of the bigger technological feasibility evaluation of innovative design and technological solutions, projects and programs 17

Technological equipment for assembly

Zhitnikov B.Yu., Zhitnikov Yu.Z., Shchetkin A.V. The device of the automated installation of elastic rings in internal flutes of details 23

Assembly welding works. Soldering

Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Soldering large massive structures 25

Industrial and design engineer's aid

Kovyazin R.A., Lagunova Yu.A., Porogskiy K.P. The analysis of wireless systems of active cooling of working liquids of debalance high — frequency vibrators for mobile drilling rigs 39

Different

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Zheleznikova O.E. System disinfection with ultraviolet light 44

Journal is distributed on subscription, whith can be issues 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) 269-54-98. Fax: (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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.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
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
V.A. NIKOLAEV
ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA
TOLIATI
A.I. RYZHKOV
TULA
A.I. PREYS
KHABAROVSK
V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI
POLAND
P.LEBKOVSKI
E. LUNARSKI

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

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate IE . 77-1747, February 25, 2000

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2015

УДК 658.5.012

В.А. Долгов, *д-р техн. наук (МГТУ "СТАНКИН"),*
Э.В. Попов, *канд. экон. наук (ОАО "Туполев", Москва),*
А.А. Кабанов *(ООО "ГЕТНЕТ Консалтинг", Москва),*
Э.Р. Тимерханова *(ОАО "Туполев", Москва)*
E-mail: vdolgov@yandex.ru

Повышение эффективности ремонта и модернизации летательных аппаратов на ОАО "Туполев" путем разработки гибкой информационной модели производственно-технологических решений

Предложен способ повышения эффективности ремонта и модернизации летательных аппаратов на основе использования гибкой информационной модели производственно-технологических решений.

Proposed a method of efficiency improvement of repair and modernization processes of aerial by developing a flexible information model of production and technological solutions.

Ключевые слова: информационное обеспечение, ремонт и модернизация, летательный аппарат, гибкая информационная модель, производственно-технологическое решение, оперативно-календарное планирование.

Keywords: informational support, repair and modernization, aerial vehicle, flexible information model, production and technological solution, operative scheduling.

Введение

Одним из путей повышения эффективности ремонта и модернизации летательных аппаратов (ЛА) является использование автоматизированных систем оперативно-календарного планирования — систем класса MES (Manufacturing Execution Systems), которые обеспечивают возможность оперативной разработки сменно-суточных заданий в соответствии с производственной ситуацией и текущими организационно-экономическими требованиями (ОЭТ).

Проведенный анализ процессов оперативно-календарного планирования [1, 2] показал, что эффективность использования таких систем во многом определяется наличием гибких информационных связей технологических и производственных решений [3].

Технологические решения определяют следующие основные группы данных:

- состав и последовательность выполнения операций;
- состав ресурсов, необходимых для выполнения каждой операции;
- правила выполнения каждой операции, включая технологические режимы, нормы трудоемкости и др.;
- исходные предметы труда, в том числе комплектующие изделия для выполнения операций монтажа.

Производственные решения определяют производственные расписания, обеспечение ресурсами технологических операций, обеспечение комплектующими изделиями и материалами.

Системы оперативно-календарного планирования обеспечивают интеграцию технологических и производственных решений и формируют настроенные производственно-технологические решения (НПТР) в соответствии с производственной ситуацией и текущими ОЭТ.

Эффективность формирования настроенных производственно-технологических решений определяется гибкостью информационных моделей технологических процессов.

Проведенный анализ информационной модели производственно-технологических решений ремонта и модернизации ЛА на ОАО

"Туполев" (рис. 1) позволил выявить следующие ее недостатки:

1) отсутствуют информационные связи между операциями ремонта, позволяющие адаптировать последовательность их выполнения в зависимости от технического состояния конкретного ЛА, установленного в результате дефектации, и текущего состояния производственной системы, которое определяется доступностью технологически необходимых ресурсов и наличием комплектующих изделий;

2) отсутствуют информационные связи операций с ресурсами (рабочими), позволяющие учитывать обеспеченность операций ресурсами для определения производственного цикла их выполнения;

3) длительность операций на циклограмме задана укрупненно. Например, для операции (3) трудоемкость равна трем рабочим дням, а на циклограмме длительность работы равна одной неделе, т. е. пяти рабочим дням (см. рис. 1). Таким образом, 40 % календарного времени не учтено;

4) отсутствуют информационные связи операций с альтернативными ресурсами, позволяющие оперативно перераспределять ресурсы

Операция	Бригада	Трудоемкость, ч	Число рабочих	Цикл, дней	Недели работы
Демонтаж съемного оборудования системы электроснабжения	ЭПО	143,5	4	4,5	
Демонтаж, очистка, дефектация приборного оборудования	НК	49,9	3	2	(1)
Демонтаж связного оборудования	НК	130,1	3	5,5	
Демонтаж гидравлической системы	СД	206,5	3	8,5	
Демонтаж съемных электрожгутов системы электроснабжения	ЭПО	49	2	3	(3)
Демонтаж радиоаппаратуры самолетовождения	РО	129,3	2	8	
Демонтаж КИ гидравлической системы	СД	271,6	3	11,5	
Демонтаж пилотажно-навигационного комплекса	НК	142,5	2	9	
Демонтаж радиоаппаратуры опознавания оповещения и активного ответа	РО	82,6	2	5	
Демонтаж ПКИ кислородного оборудования	СОЖ	74,2	2	4,5	
Демонтаж бортовых средств контроля и регистрации полетных данных контроля и регистрации полетных данных	ЭПО	87,2	2	5,5	(1)
Демонтаж радиоаппаратуры управления наведения и целеуказания	НК	122,5	3	5	
Демонтаж, очистка, дефектация масляной системы	ЭПО	48,2	2	3	(2)
Демонтаж, очистка приборов контроля двигателя	ЭПО	51,7	2	3,5	
Демонтаж системы воздушной подпитки	СОЖ	79	3	3,3	
Демонтаж противообледенительной системы	ЭПО	166,8	2	10,5	

Рис. 1. Циклограмма выполнения работ по данным завода:
1 — связи предшествования между операциями явно не заданы; *2* — одновременное выполнение работ в рамках бригады одной специализации; *3* — несоответствие значений трудоемкости и нанесенного на циклограмму цикла работ

между операциями в зависимости от текущего состояния производственной системы.

Существующие информационные модели технологических процессов содержат конструкторско-технологические решения и предназначены для использования в производственной системе, обладающей следующими характеристиками:

- состояние системы не зависит от влияния внешних факторов;
- состояние системы с течением времени остается неизменным;
- поведение системы объяснимо и предсказуемо.

При использовании существующих информационных моделей основным управляемым параметром разрабатываемого производственного плана является очередность выполнения операций ремонта (демонтажа и монтажа) на установленных постах в соответствии с заданной последовательностью и наличием доступных ресурсов — средств технологической оснастки (СТО) и рабочих, а также комплектующих. Использование одного управляемого параметра существенно снижает возможности оперативного планирования производства и приводит к непродуктивным потерям времени.

Информационная модель технологического процесса определяет типовой вариант выполнения работ по ремонту и модернизации летательного аппарата среднестатистического технического состояния, выполняемых в свободной от других заказов производственной системе.

Отсутствие указанных информационных связей не позволяет оперативно изменять последовательность выполнения операций на одном рабочем месте (посту) и перераспределять операции между ними при гарантированном обеспечении заданного качества.

Описание модели

Для повышения эффективности оперативно-календарного планирования операций ремонта и модернизации ЛА на ОАО "Туполев" предложено использовать информационную модель производственно-технологических решений, представленную на рис. 2 [4].

Информационная модель производственно-технологических решений включает базовое производственно-технологическое решение (БПТР) и НПТР.

Технологические решения ремонта и модернизации ЛА состоят из неизменной (директивный технологический процесс) части

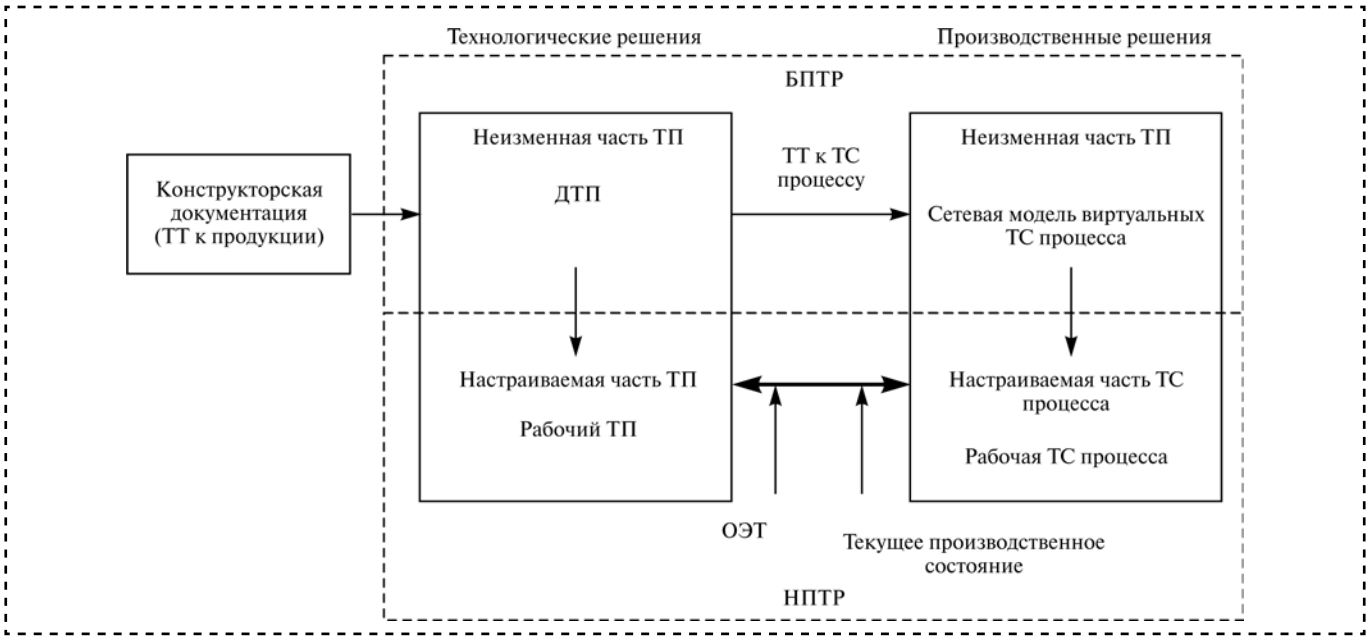


Рис. 2. Информационные связи технологических и производственных решений:
ТТ — технические требования; ТП — технологический процесс; ДТП — директивный технологический процесс; ТС — технологическая система

и настраиваемой (рабочий технологический процесс).

Базовое и настроенное производственно-технологические решения содержат информационно связанные технологические и производственные решения.

Неизменная часть технологического процесса (ТП) входит в БПТР и содержит требования:

- к составу операций и допустимой последовательности их выполнения;
- к технологическим режимам и нормам времени;
- к техническим возможностям средств технологического оснащения;
- к квалификации рабочих и их численности;
- к комплектующим изделиям и материалам.

Настраиваемая часть ТП входит в НПТР и содержит:

- установленную последовательность выполнения операций;
- выбранные средства технологического оснащения;
- поименный перечень рабочих.

Производственные решения ремонта и модернизации ЛА состоят из неизменной и настраиваемой частей технологической системы процесса.

В соответствии с ГОСТ 27.004—85 технологическая система процесса рассматривается как техническая система, включающая в себя в качестве подсистем совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных операций, относящихся к одному методу или к одному наименованию изготовляемой продукции.

Базовое ПТР формируется на стадии технологической подготовки производства конкретного ЛА на основании результатов дефектации в рамках применяемого на предприятии технологического метода под управлением технических требований (ТТ), определенных в конструкторской документации.

Настроенное ПТР формируется на стадии оперативно-календарного планирования.

Базовое ПТР определяет область определения альтернативных вариантов производственно-технологических решений выполнения операций ремонта и модернизации, каждый из которых обеспечивает требуемую точность, но отличается производительностью и себестоимостью. Кроме того, оно определяет набор производственно-технологических решений, обеспечивающих получение продукции требуемого качества. Решение состоит из взаимосвязанных данных директивного технологического процесса (ДТП) ремонта и модернизации ЛА и виртуальных технологических систем процесса. Таким образом, на первом этапе определяется область допустимых производственно-технологических решений.

В соответствии с ТТ для выполнения каждой работы формируется множество альтер-

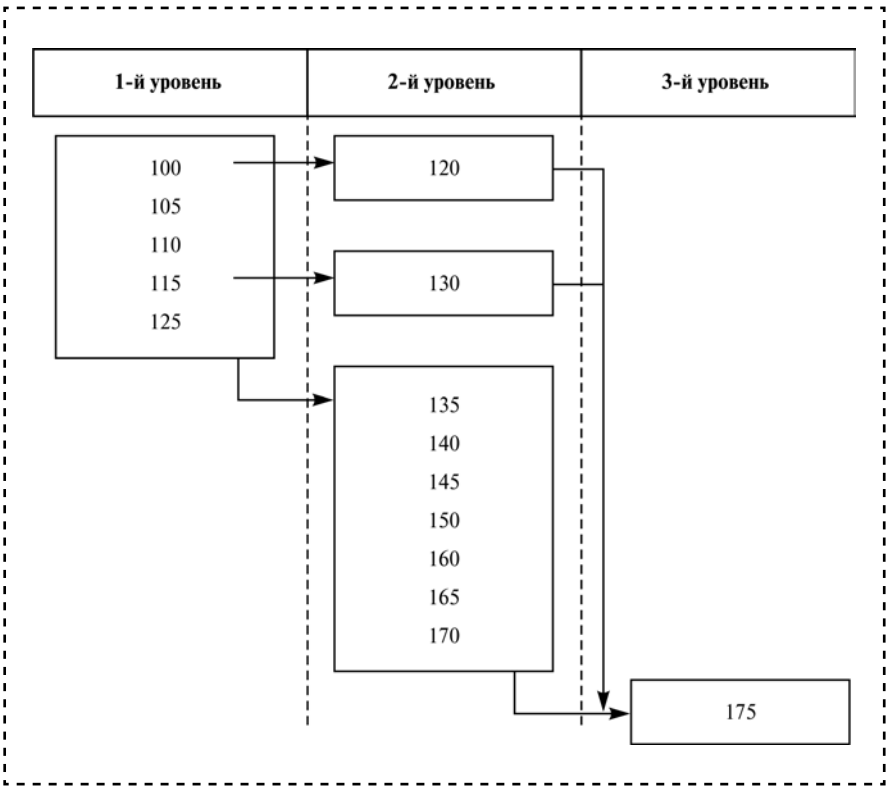


Рис. 3. Связи предшествования выполнения операций, представленных в таблице

нативных технологических систем (ТС) операций. Возможные варианты использования альтернативных ТС операций для выполнения работ, определенных ДТП, образуют виртуальные модели ТС процесса. Каждая модель ТС процесса обеспечивает требуемые ТТ к продукции, но отличается уровнем потребляемых ресурсов. В качестве математической модели виртуальных ТС процессов используют сетевую модель, а их реализацию исследуют постановкой экспериментов на имитационной модели [5].

Неизменная часть технологической системы процесса ремонта и модернизации содержит сетевую модель виртуальных технологических систем процесса, представленную в таблице и на рис. 3.

В таблице приведены следующие коды бригад:

- ЭПО — "Электронные приборы и оборудование";

Фрагмент сетевой модели виртуальных технологических систем процесса

№ п/п	Код операции	Операция	Трудоемкость, ч	СТО, код	Число рабочих, чел.	Код бригады
100	26	Демонтаж съемного оборудования системы электроснабжения	143,5	хххх	4	ЭПО, СОЖ
105	20	Демонтаж, очистка, дефектация приборного оборудования	47,9	хххх	3	НК
110	22	Демонтаж связного оборудования	130,1	хххх	3	НК
115	28	Демонтаж гидравлической системы	206,5	хххх	3	СД
120	27	Демонтаж съемных электрожгутов системы электроснабжения	49	хххх	2	ЭПО
125	3	Демонтаж радиоаппаратуры самолетовождения	129,3	хххх	2	РО
130	29	Демонтаж КИ гидравлической системы	271,6	хххх	3	СД, НК
135	2	Демонтаж пилотажно-навигационного комплекса	142,5	хххх	2	НК
140	21	Демонтаж радиоаппаратуры опознавания оповещения и активного ответа	82,6	хххх	2	РО
145	25	Демонтаж комплектующих кислородного оборудования	74,2	хххх	2	СОЖ
150	32	Демонтаж бортовых средств контроля и регистрации полетных данных контроля и регистрации полетных данных	87,2	хххх	2	ЭПО
155	14	Демонтаж, очистка, дефектация масляной системы	48,2	хххх	2	ЭПО
160	10	Демонтаж, очистка приборов контроля двигателя	51,7	хххх	2	ЭПО
165	33	Демонтаж системы воздушной подпитки	79,0	хххх	3	СОЖ
170	30	Демонтаж противообледенительной системы	166,8	хххх	2	ЭПО, СОЖ
175	19	Демонтаж радиоаппаратуры управления наведения и целеуказания	122,5	хххх	3	НК

- СОЖ — "Средства обеспечения жизнедеятельности";
- НК — "Навигационный комплекс";
- СД — "Самолет и двигатель";
- РО — "Радиоэлектронное оборудование".

Для выполнения разных операций могут использоваться рабочие из одной и той же бригады. Также рабочие из разных бригад могут задаваться как альтернативные ресурсы для выполнения одной и той же работы. Таким образом, формируется конкурентно-ресурсное описание сетевой модели.

Операции, расположенные на одном уровне, технологически допускается выполнять в любой последовательности. Операции, находящиеся на разных уровнях, имеют связи предшествования. Например, операция 120 может начаться только после окончания операции 100 независимо от окончания других операций 1-го уровня (см. рис. 3). Таким образом, предложенная информационная модель содержит множество альтернативных вариантов выполнения операций ремонта и модернизации, заданных виртуально.

Настроенное производственно-техническое решение создается путем адаптации БПТР к текущим производственным условиям в соответствии с организационно-экономическими требованиями и содержит взаимосвязанные данные рабочего технологического процесса (РТП) и рабочей ТС процесса (см. рис. 2).

Организационно-экономические требования, исходя из заданной производительности ТС процесса и уровня затрат, определяют требования к производительности ТС операции, трудоемкости, к материальным и финансовым затратам, а также требования к надежности по параметрам: качества изготавливаемой продукции, производительности и затрат.

Выводы

Использование предложенной гибкой информационной модели производственно-технологических решений позволяет увеличить число управляемых параметров разрабатываемого оперативного производственного плана, которыми являются:

- *очередность выполнения операций на различных постах с использованием одних и тех же ресурсов;*
- *последовательность выполнения операций в соответствии с установленными связями предшествования;*
- *использование альтернативных ресурсов для выполнения одной и той же операции.*

По предварительным оценкам использование разработанной гибкой информационной модели производственно-технологических решений может повысить производительность ремонта и модернизации ЛА на ОАО "Туполев" более чем на 30 %.

Библиографические ссылки

1. **Фролов Е.Б.** Производственные исполнительные системы MES: реальная эффективность // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 5. С. 48—50.

2. **Grigoriev S.N., Kutin A.A., Turkin M.V.** Modelling complex production processes in aerospace industry based on dimensional analysis // 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS). Setubal, Portugal. Date: MAY 29—30, 2013 / Book Series: Procedia CIRP. 2013. Vol. 7. P. 473—478.

3. **Dolgov V.A.** Simulation of technological systems in custom production // Russian engineering research. 2010. Vol. 30. Issue 9. P. 951—955.

4. **Долгов В.А.** Информационная модель технологической системы операций, предназначенная для оперативного формирования технологических систем процесса // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 2. С. 34—39.

5. **Кабанов А.А.** Оценка эффективности функционирования производственной системы дискретного машиностроительного производства с применением методов сетевого и имитационного моделирования. Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матер. 14-го Междунар. науч.-технич. семинара, 24—28 февраля 2014. Свалява. Киев: АТМ Украины, 2014. С. 78—80.

УДК 658.527.011

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

Оценка технологичности деталей и узлов применительно к автоматической сборке

В общем виде сформулированы рекомендации по технологичности деталей и узлов с позиций автоматической сборки. Количественную оценку технологичности деталей следует давать по критерию сложности их автоматической ориентации — по соотношению общего числа различимых положений детали в пространстве и числа ее устойчивых положений. Для количественной оценки технологичности изделия полезно использовать также относительный показатель в виде уровня трудоемкости его сборки.

Recommendations for manufacturability of parts with automatic assembly items are generally formulated. The quantitative evaluation of the manufacturability of parts should be given according to the criterion of its difficulty with automatic orientation items on a parity between the total number of the part in the space and the number of it stable positions. It is also useful to use the relative indicator in the form of the level of the product assembly labor input for it quantitative manufacturability evaluation.

Ключевые слова: технологичность деталей и узлов, автоматическая ориентация деталей, уровень трудоемкости сборки.

Keywords: manufacturability of parts and units, automatic orientation of parts, level of the assembly labor input.

Типовая структурная схема автоматической сборки включает следующие этапы (рис. 1):

- подача деталей в позицию сборки с помощью автоматических загрузочных устройств (АЗУ);
- совмещение и базирование деталей в позиции сборки (СиБ);
- контроль правильности совмещения деталей (КС);
- коррекция совмещения (Кор.С);
- соединение деталей в узел (СДУ);
- контроль собранного узла (КСУ);
- удаление собранного узла из зоны сборки с сохранением его ориентации (УСУО) [1, 3].

По многим оценкам основная трудоемкость (70...80 %) в приведенной структуре сборочного технологического процесса приходится на операции подачи, ориентации и совмещения деталей в зоне сборки и лишь около 30...20 % — на операции соединения узла. Степень сложности сборочного технологического процесса

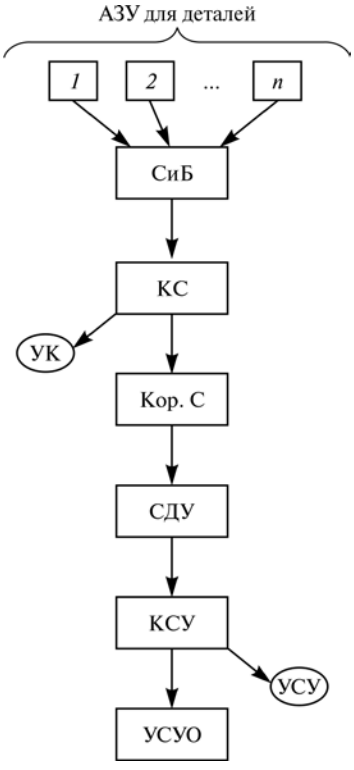


Рис. 1. Типовая структурная схема автоматической сборки:
1, 2, ..., n — АЗУ деталей; УК — удаление комплекта из позиции сборки; УСУ — удаление собранного узла в изолятор брака по результатам контроля

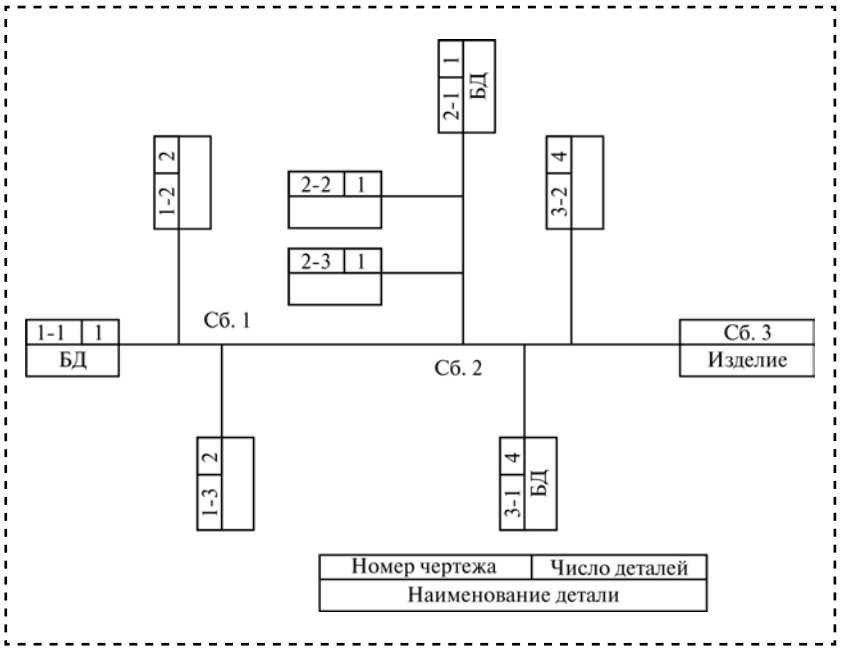


Рис. 2. Технологическая схема сборки изделия из трех узлов (три ступени)

выражается числом ступеней сборки (по числу узлов собираемого изделия).

В качестве примера приведем технологическую схему трехступенчатой сборки изделия, состоящего из трех узлов (рис. 2).

Сборка начинается с подачи в позицию сборки базовой детали (БД). Затем в требуемой последовательности подают другие детали, входящие в первый узел. На технологической схеме кроме названия детали указывают ее номер по чертежу и число деталей в узле. В первый узел (Сб. 1) кроме базовой детали (БД) входят по две детали с номерами 1-2 и 1-3. Второй узел (Сб. 2) состоит из БД 2-1 и деталей 2-2 (1 шт.) и 2-3 (1 шт.). Третий узел (Сб. 3) в данном примере представляет собой готовое изделие.

При оценке сложности технологического процесса сборки необходима процедура декомпозиции изделия с разбивкой его на узлы и детали и выделением для каждого узла базовой детали. В качестве базовой обычно выбирают деталь, которая допускает установку на нее других деталей узла с помощью простых движений сборочного механизма, например, перемещением механизма сверху вниз. В этом случае за основу может быть взят анализ движений, совершаемых оператором при ручной сборке [1—3].

Любой сборочный процесс требует обязательной ориентации сопрягаемых деталей в пространстве относительно заданной системы координат. Трудоемкость конструкторских решений этой задачи достаточно велика. Поэтому логично количественную оценку технологичности собираемых деталей давать по критерию сложности с позиций автоматической ориентации. Критерий сложности можно определять по соотношению общего числа возможных различимых положений детали в пространстве $N_р$ и числа ее устойчивых положений $N_у$ при размещении детали на базовой плоскости механизма ориентации. Число $N_у = N_р - N_н$, где $N_н$ — число неустойчивых положений детали. Примером неустойчивого

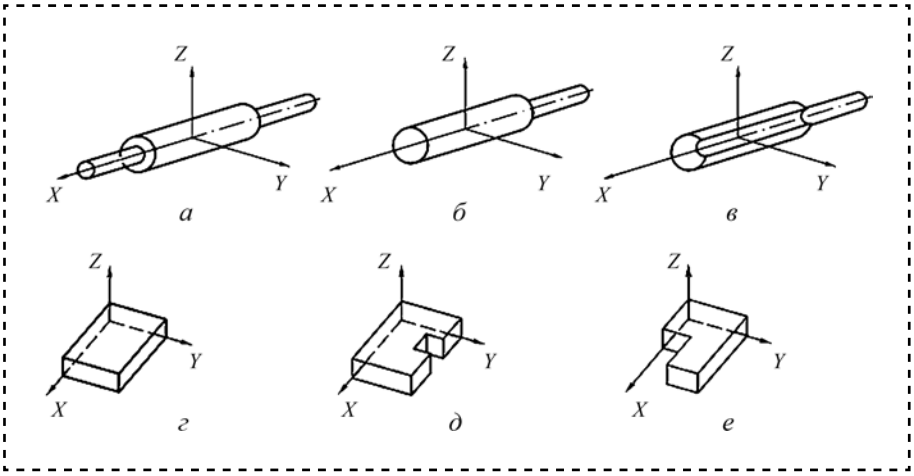


Рис. 3. К определению критериев технологичности для тел вращения (*а—в*) и для плоских и призматических деталей (*г—е*):
а — $n_i = 1$, $n_j = \infty$ (ориентация по положению оси в пространстве); *б* — $n_i = 1$ (ориентация по торцу); *в* — $n_i = 0$, $n_j = 1$ (дополнительная ориентация по угловой координате); *г* — $n_i = 0$, $n_j = 2$ (для квадрата) и $n_j = 3$ (для прямоугольника); *д* — $n_i = 0$, $n_j = 2$ (ориентация по ключу); *е* — $n_i = 0$, $n_j = 5$ (для квадрата) и $n_j = 1$ (для прямоугольника)

положения является размещение тонкого диска на ребре.

Так как заданное чертежом требуемое положение детали всегда одно, то критерий сложности рассчитывают как вероятность появления заданного положения детали $P(N_p) = 1/N_p$ или $P(N_y) = 1/N_y$, причем для практических оценок достаточно второго выражения. Так, для тонкого диска с различным рисунком опорных поверхностей (например, монеты) имеем $N_y = 2$ и $P(N_y) = 1/2$.

Значения N_p и N_y зависят от чисел осей n_i и плоскостей n_j симметрии детали (рис. 3), причем с увеличением n_i и n_j число N_p убывает и, следовательно, растет значение $P(N_p)$. При $P(N_p) \to \max$ деталь оценивают как оптимальную с позиций технологичности, т.е. сложности осуществления процесса автоматической ориентации. В частности, для сферы (например, шарик подшипника) $n_i = \infty$ и $n_j = \infty$, и поэтому число $N_p = 1$ (т.е. минимально), а вероятность $P(N_p) = 1$ (т.е. максимальна). Это означает, что сферическая деталь не требует ориентации.

В общем виде можно сформулировать следующие рекомендации по технологичности деталей с позиций автоматической сборки (рис. 4):

- детали должны быть по возможности симметричными или обладать явно выражен-

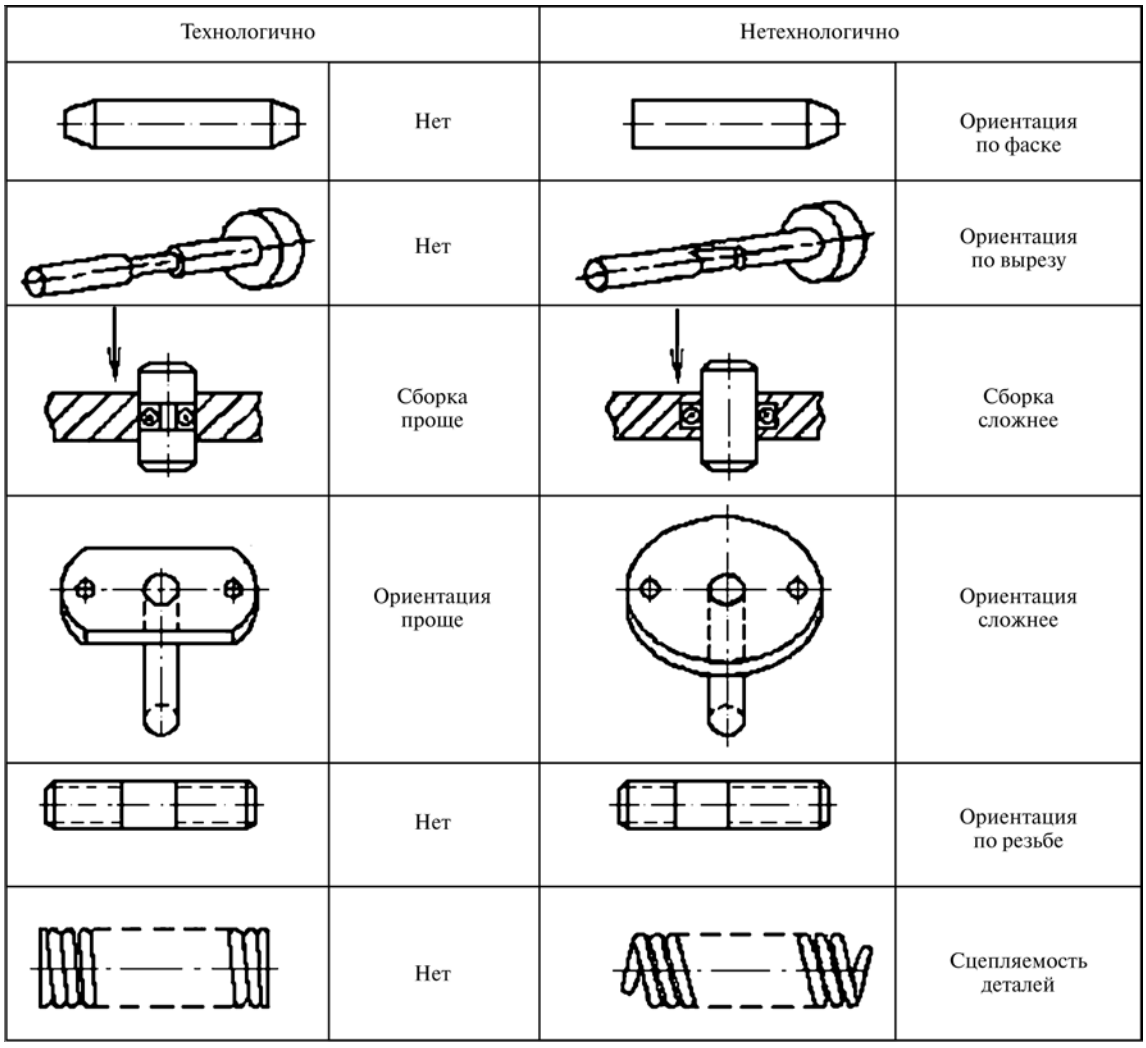


Рис. 4. Примеры качественной оценки технологичности деталей применительно к автоматической сборке

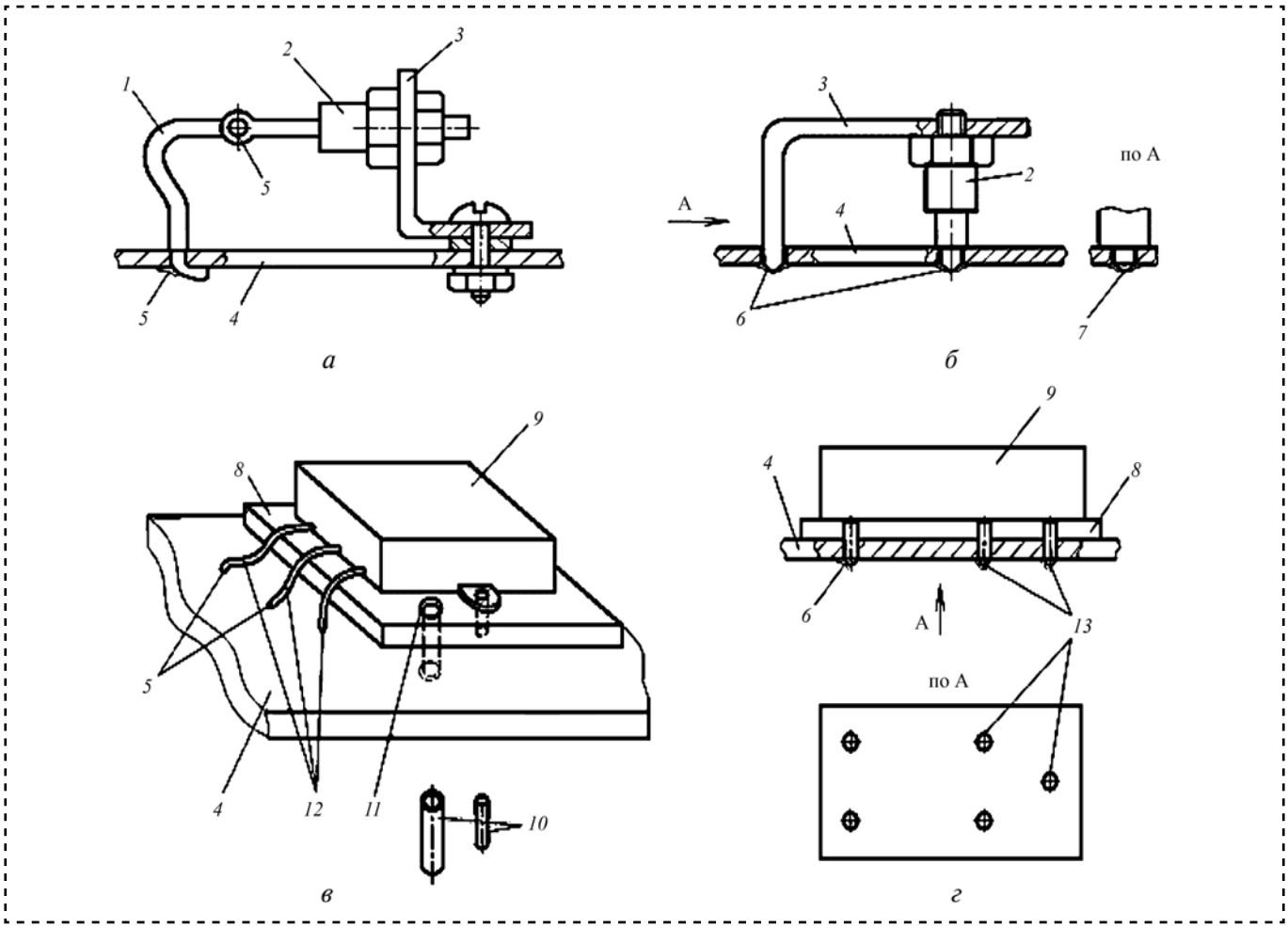


Рис. 5. Примеры изменения конструкции полупроводникового диода (*а*, *б*) и линейного фильтра (*в*—*г*) под автоматический монтаж на ПП (*а* и *в* — традиционные конструкции, *б* и *г* — модернизированные):
1, *12* — гибкие выводы; *2* — диод; *3* — уголок-радиатор; *4* — ПП; *5* — ручная пайка; *6* — пайка горячим воздухом; *7* — облуженный выступ уголка; *8* — изолятор; *9* — фильтр; *10* — пистоны; *11* — развальцовка пистонов; *13* — стержневые выводы

ной асимметрией, предусматривающей обязательное наличие ключа ориентации (признака, однозначно определяющего требуемое положение детали в пространстве);

- допуски на размеры деталей должны исключать применение переходных посадок в соединениях (т.е. обеспечивать гарантированные зазор или натяг);
- конструкция деталей должна обеспечивать возможность соединения узла методом пластической деформации (запрессовка, завальцовка и т.п.).

Последнее требование связано с рекомендацией избегать соединений, требующих наличия дополнительной детали (например, шплинтование, штифтовка, установка стопорной шайбы, пружин и т.п.). Однако дополнительные детали неизбежны в разъемных соединениях.

Технологичной считается конструкция узла, при сборке которого соединение деталей можно выполнить простым движением инструмента (например, вертикальный ход при запрессовке, вращение при свинчивании). Это позволяет применять относительно недорогие сборочные роботы (с двумя или тремя степенями подвижности) [2, 3].

Примеры изменения конструкций изделий для осуществления автоматической сборки показаны на рис. 5.

В частности, усовершенствованная конструкция мощного диода *2* под автоматиче-

ский монтаж на печатную плату (ПП) *4* позволила исключить пять деталей (две гайки, винт, две шайбы), гибкий проводник *1* и ручную пайку *5* (рис. 5, *а* и *б*). Новая конструкция линейного фильтра *9* обеспечивает его монтаж на печатную плату без четырех пистонов *10*, гибких выводов *12* с исключением операций развальцовки и ручной пайки (рис. 5, *б*, *в* и *г*).

Для количественной оценки технологичности изделия используют также относительный показатель в виде уровня трудоемкости $y_т$ сборки объекта

$$y_т = T_д/T_б,$$

где $T_д = \sum_1^n t_i$, $T_б = \sum_1^n t_{нi}$ — достигнутая (в результате автоматизации) и базовая (существующая) трудоемкости сборки соответственно; $t_{нi}$ — нормативная трудоемкость i-й сборочной операции в нормо-часах.

Характерный пример совместной работы конструкторов и технологов по технологичности сборки приводит фирма Хитачи (Япония). Перевод лентопротяжных механизмов (ЛПМ) на автоматизированную сборку потребовал пересмотра и совершенствования конструкции ЛПМ с целью упрощения сборки. В результате тщательного анализа ЛПМ фирма разработала практически новый механизм, в котором большинство деталей и узлов устанавливаются и фиксируются простым движением рабочего органа сверху. Для анализа конструкции ЛПМ использовалась специальная методика оценки пригодности узлов к автоматической сборке по 100-балльной шкале [3]. Алгоритм оценки и совершенствования конструкции узлов ЛПМ представлен на рис. 6.

В улучшенной конструкции ЛПМ число деталей сократилось на 81 (с 460 до 379), а показатель пригодности к сборке повысился с 63 до 73 баллов.

Рис. 6. Алгоритм оценки и совершенствования конструкции узлов ЛПМ

Вывод

Количественную оценку технологичности собираемых деталей логично давать по критерию сложности их с позиций автоматической ориентации. Критерий сложности можно определять по соотношению общего числа возможных различимых положений детали в пространстве $N_р$ и числа ее устойчивых положений $N_у$ при размещении детали на базовой плоскости механизма ориентации. Кроме этого, полезно также использовать относительный показатель технологичности изделия в виде уровня трудоемкости $y_т$ сборки объекта.

Библиографический список

1. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М.: Форум, 2011. 224 с.

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

3. Иванов А.А. Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: Форум, 2012. 336 с.

УДК 621.833

С.Г. Костенко, *канд. техн. наук*
(Курганский государственный университет)
E-mail: kss_101@mail.ru

Конструкция и способ сборки планетарного редуктора с арочным зубчато-роликовым зацеплением

Зубчатые передачи, работающие в тяжелых условиях, должны обладать повышенной нагрузочной способностью и свойством ремонтопригодности. Этому требованию отвечают зубчато-роликовые передачи с арочными зубьями. Однако такие передачи не обладают эффектом многопоточности, свойственным планетарным передачам. Предложена конструкция и способ сборки планетарного редуктора с арочным зубчато-роликовым зацеплением, отвечающим перечисленным требованиям.

The tooth gearings working under trying conditions have to possess the increased loading ability and can be repaired. Tooth gearings and roller gearings with arch teeth meet these requirements, but such gearings don't have the effect of multiline production, which is peculiar for planetary gears. This article suggests the design and way of assembly of a planetary reducer with arch gear and roller gearing, which meets all above-mentioned requirements.

Ключевые слова: зубчатая передача, арочные зубья, планетарный редуктор.

Keywords: tooth gearing, arch teeths, planetary reducer.

В ряде отраслей машиностроения — в горно-рудной промышленности, в сельскохозяйственной технике и дорожных машинах, в машинах и аппаратах перерабатывающей промышленности — зубчатые передачи работают в тяжелых условиях, обусловленных недостаточной смазкой и запыленной средой. Это позволяет утверждать, что одним из важных свойств, которым должны обладать зубчатые передачи, работающие в тяжелых условиях, является свойство ремонтопригодности.

Свойством ремонтопригодности обладают передачи на базе зацепления с промежуточными телами [1—5].

Исследования, проведенные отечественными учеными А.Е. Беляевым, М.Л. Ерихо-вым, С.В. Старухиным, П.В. Ольштынским, Е.А. Фехом, показали, что такие передачи обладают рядом достоинств, делающих их перспективными для повышения ресурса тяжелонагруженных приводов машин. К основным их достоинствам относят:

- высокий уровень ремонтопригодности;
- повышенную контактную и изломную прочность;
- повышенную износостойкость.

Однако такие передачи не обладают эффектом многопоточности, свойственным планетарным передачам.

Эффектом многопоточности обладает конструкция планетарной зубчатой роликовой передачи, содержащая центральные колеса с шевронными впадинами кругового профиля в нормальном сечении и сателлиты, выполненные двухвенцовыми, во впадины которых уложены зубья-ролики, изогнутые по винтовой спирали. Недостатками данной конструкции являются большие осевые габариты передачи и рассогласование фаз шаговых погрешностей на полушевронах, возникающих при раздельном изготовлении полушевронов и их сборке, приводящих к снижению нагрузочной способности передачи.

Повысить нагрузочную способность указанного планетарного редуктора можно за счет установки промежуточных элементов зацепления — тороидальных роликов, обладающих возможностью самоустановки, в арочные впадины между зубьями центральных колес, вместо шевронных, что исключает наличие фаз шаговых погрешностей. Выполнение впадин колес арочной формы одновременно приводит и к сокращению осевых габаритов планетарного редуктора за счет исключения раздельного изготовления полушевронов.

Конструкция планетарного редуктора, выполненного по схеме $2k—h$, у которого боковые поверхности зубьев центральных колес,

сателлитов и поверхности роликов имеют в пространстве арочную форму, а в нормальном сечении — круговой профиль, изображена на рисунке.

Планетарный редуктор содержит центральные колеса *2* и *10* и сателлиты *6* с арочными, образованными смежными впадинами кругового профиля, зубьями. Во впадины центрального колеса *2* уложены тороидальные ролики-зубья *3*, а во впадины центрального колеса *10* уложены ролики-зубья *12*. Торцы роликов-зубьев *3* и *12* закреплены соответственно в упругих вставках *5* и *1*. Вставки *5* и *1* размещены в кольцевых торцовых пазах сепараторов *4* и *8*, а также сепаратора *13*.

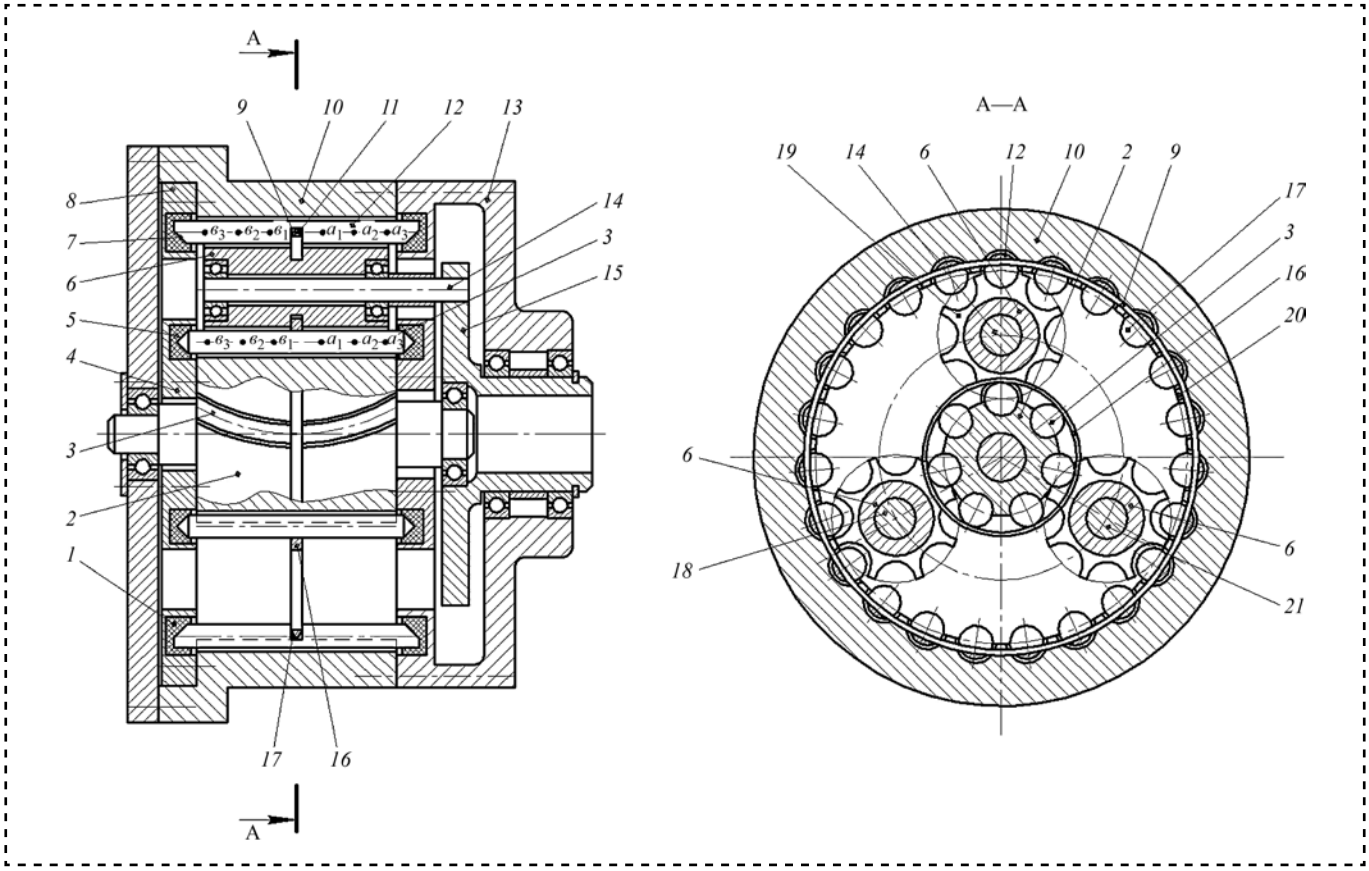
В среднем сечении зубчатого венца центрального колеса *10* выполнена кольцевая проточка *20*, в которую установлено охватывающее ролики-зубья *12* упругое в радиальном направлении кольцо *9*. Внутренний диаметр кольца *9* превосходит сумму удвоенного межосевого расстояния и диаметра вершин сателлита, а внешний диаметр кольца меньше диаметра впадин колеса *10*.

Чтобы ролики-зубья *12* были прижаты к впадинам зубьев колеса *10*, в среднем сечении роликов-зубьев фрезеруют пазы *17* для размещения в них кольца *9*. В среднем по ширине сечении центрального колеса *2* установлено охватывающее ролики-зубья *3* центральное кольцо *16*, которое компенсирует центробежные силы, действующие на ролики *3*. На сателлитах *6* в среднем сечении выполнены кольцевые канавки *19*, а в зонах зацепления центрального колеса *2* с сателлитами в канавках *19* размещено кольцо *16*.

Сборка планетарного зубчато-роликового редуктора осуществляется в следующей последовательности.

На центральном колесе *10* устанавливают несколько равномерно расположенных по окружности групп роликов (число групп равно числу сателлитов). Чтобы предотвратить выпадение роликов-зубьев *12* из впадин колеса *10* при сборке ролики фиксируют упругим кольцом *9*, имеющим две фаски *11*.

При установке ролика *12* во впадины между зубьями центрального колеса *10* торец ролика,



Планетарный редуктор с арочным зубчато-роликовым зацеплением

выполненный в форме клина *7*, выводит упругое кольцо *9* из кольцевой проточки *20*. Как только ролик упрется своим концом в резиновую вставку *1* крышки-сепаратора *13*, кольцо *9* попадает в паз *17* ролика-зуба, осуществляя таким образом "запирание" ролика во впадине колеса. Блок колесо *2* — сателлиты *6* — водило *15* собирается отдельно следующим образом.

На двух осях *18* и *21*, закрепленных на водиле *15*, устанавливают два сателлита *6*. Укомплектованное роликами *3* центральное колесо *2* устанавливают на два сателлита *6* так, чтобы ролики-зубья *3* вошли во впадины сателлитов *6*. Центральное колесо *2* вводят в зацепление с третьим сателлитом *6* за счет радиального движения последнего, после чего закрепляют сателлит на водиле *15* посредством установки оси *14*. Затем собранный блок колесо *2* — сателлиты *6* — водило *15* вводят осевым движением в колесо *10*, а смонтированные на колесе *10* группы роликов в это время находятся между сателлитами.

Угловым разворотом водила вокруг его оси сателлиты вводят в зацепление с роликами, а в пространстве между сателлитами устанавливают следующие группы роликов. После установки всех групп роликов-зубьев *12* производят крепление сепаратора *8*.

Планетарный зубчато-роликовый редуктор работает следующим образом.

Передача крутящего момента от центрального колеса *2* к водилу *15* передается за счет роликов-зубьев *3* и *12*. В начальный период времени в зоне среднего сечения зубчатого венца передачи образуются две точки контакта — a_1 и $в_1$ (см. рисунок), которые при вращении центрального колеса *2* и сателлитов *6* движутся с замедлением к торцам центральных колес и сателлитов ($a_2в_2$, $a_3в_3$). При изменении направления вращения точки контакта движутся с ускорением от торцов центральных колес *2* и *10* и сателлитов *6* к среднему по ширине зубчатого венца сечению ($a_3в_3$, $a_2в_2$, $a_1в_1$).

В процессе зацепления поверхности зубьев сателлитов *6* свободно перекатываются по тороидальной поверхности роликов-зубьев *3* и *12*. При этом различные участки роликов-зубьев *3* и *12* отходят от основания впадин между зубьями центральных колес *2* и *10* или сближаются с ними.

Деформаций роликов-зубьев *12* при их поджатии к центральному колесу не происходит за счет наличия радиальных зазоров в зацеплении. Возможность колебательного движения роликов-зубьев *12* обеспечивается за счет упругих вставок *1* и упругого кольца *9*, а роликов-зубьев *3* за счет упругих вставок *5*.

Отличительными особенностями планетарного редуктора с арочным зубчато-роликовым зацеплением являются:

1) возможность восстановления зазоров в передаче за счет промежуточного элемента зацепления — ролика. Изношенные впадины между зубьями центральных колес и сателлитов могут неоднократно перерезаться и работать в паре с роликами ремонтных размеров. Кроме того, промежуточный элемент дает возможность управлять износом элементов зацепления;

2) профили впадин между зубьями центральных колес и сателлитов одинаковы и представляют собой дуги окружностей;

3) зубья центральных колес и сателлитов не имеют головок, а состоят только из ножек вогнутого кругового профиля.

Предлагаемый способ сборки позволяет собирать планетарный редуктор с арочным зубчато-роликовым зацеплением, обладающим повышенной нагрузочной способностью и долговечностью за счет уменьшения неравномерности распределения нагрузки по длине зубьев при перекосах осей зубчатых колес, а также сокращению осевых габаритов редуктора за счет исключения раздельного изготовления полушевронов.

Библиографический список

1. **А. с. 439653 СССР**, кл F16H1/24. Зубчатая роликовая передача / Старухин С.В., 1974.

2. **А. с. 1446390 СССР**, кл F16H1/24. Зубчатая роликовая передача / Ерихов М.Л., Костенко С.Г., Ольштынский П.В., Горохов В.М., 1988.

3. **Патент РФ** № 2191302. Зубчатая роликовая передача / А.П. Третьяков, В.А. Вотинов, С.Г. Костенко, В.Я. Герасимов // 2002. Бюл. № 29.

4. **Костенко С.Г.** Разработка и исследование цилиндрической зубчато-роликовой передачи с арочными зубьями // Современные проблемы машиностроения: труды 5-й Междунар. науч.-техн. конф. Томск: Изд-во национального исследовательского Томского политехнического университета, 2010. С. 69—71.

5. **Ольштынсий П.В.** Создание ремонтопригодных зубчато-роликовых передач для тяжелонагруженных приводов // Прогрессивные технологии в обучении и производстве. Мат. Всероссийской конф. Волгоград, 2002. С. 28.

УДК 658.005.5

В.В. Хоменко, *канд. техн. наук*
(АНО "НТИЦ "ТЕХКОМ")
E-mail: Techcom.space@gmail.com

Методика укрупненной оценки технологической реализуемости инновационных конструкторско-технологических решений, проектов и программ

Предложена укрупненная методика оценки технологической реализуемости изделий и программ создания новой высокотехнологичной продукции, позволяющая повысить обоснованность оценки их ресурсной реализуемости на ранних стадиях создания в части объемов и сроков работ по технологическому обеспечению производства и снизить риски проектов.

Proposed assessment methodology bigger technological feasibility of products and programs to create new high-tech products, allowing to increase the validity of the assessment of the feasibility of the resource in the early stages of creation in terms of the volume and timing of the technological provision of production and reduce project risks.

Ключевые слова: оценка технологической реализуемости, высокотехнологичная продукция, ресурсная реализуемость проектов и программ.

Keywords: assessment of technological feasibility, high-tech products, resource feasibility of projects and programs.

В современных условиях, характеризующихся усложнением техники, появлением высокотехнологичных видов продукции машиностроения и приборостроения, требующих для своего создания большого числа новых технологических процессов, материалов, видов оснащения и производств, а также развитием тенденции управления жизненным циклом инновационных проектов и изделий, начиная с ранних стадий [1], все большую актуальность приобретает разработка методологии практической оценки технологической реализуемости (ТР) на ранних стадиях жизненного цикла инновационного проекта с учетом неточности и неполноты имеющейся исходной информации. Под ТР подразумевается принципиальная возможность изготовления изделия с заданными показателями качества на определенных предприятиях в заданные сроки при предполагаемых (известных) типе, специализации и кооперации производства [2]. ТР рассматривается как часть оценки ресурсной реализуемости инновационного проекта, в которой более подробно оцениваются работы, которые необходимо провести в части технологической подготовки будущего производства высокотехнологичного инновационного продукта.

Основанием для проведения оценки ТР изделий и программ, как правило, является задание, содержащееся в поручении органа управления отраслевой (корпоративной) целевой комплексной программой, например, дирекции программы и т.д.

Оценка ТР проводится на основе исходной информации, представляемой в организацию, проводящую оценку ТР, организациями-разработчиками изделий, проектными и технологическими институтами, заводами-изготовителями и другими участниками проекта.

Выходной документ по оценке ТР направляется для оценки общей (ресурсной) реализуемости изделий (систем), программ (далее по тексту для краткости — программ).

Оценка ТР должна проводиться на ранних стадиях создания изделий (НИР, техническое предложение, эскизный проект), когда имеются научно-технические и организационно-экономические проблемы, связанные с технологической подготовкой производства (ТПП) опытного и серийного выпуска изделий. На более поздних стадиях оценка ТР обычно уже не вызывает сомнений.

Следует отметить, что в международных стандартах по управлению качеством серии

ИСО (ISO 9001:2008 и ISO 9004:2009) предусмотрено проведение процедур, аналогичных проводимым в России оценкам реализуемости программ. Оценка ТР является одной из составляющих этого процесса.

На момент проведения оценки ТР по тем или иным элементам конструкции изделий и КТР возможны следующие ситуации:

1) технология изготовления отсутствует;

2) технология имеется за рубежом;

3) технология имеется в других отраслях промышленности России и отсутствует в отрасли (корпорации), включая предприятия-изготовители изделий;

4) технология полностью имеется на предприятиях-изготовителях.

В первом случае необходимо оценить возможность разработки и промышленного освоения необходимой технологии в заданные сроки (что является обычно наиболее сложной задачей оценки ТР).

Во втором и третьем случаях возможно приобретение лицензии на внедрение необходимой технологии. Тем не менее, в этих случаях необходимо провести анализ факторов, которые могут препятствовать возможности своевременного освоения необходимой технологии на рассматриваемых предприятиях, так как даже при ее наличии на других предприятиях освоение ее на том или ином предприятии может быть связано с трудностями технического, экономического и организационного характера, которые могут привести к увеличению затрат и сроков освоения производства. Поэтому специалисты, проводящие оценку ТР, должны на основе проведения указанного анализа дать экспертную оценку возможности освоения рассматриваемой технологии на данном предприятии (предприятиях) в заданные сроки.

В четвертом случае проблем по оценке ТР нет, но они могут возникнуть по вопросам оценки ресурсной реализуемости.

Для оценки ТР подготавливают следующую основную информацию:

- основные технические требования к изделию;
- основные конструктивно-технологические характеристики изделий и их составных частей;
- данные об аналогах;
- информацию о кооперации производства;
- ожидаемый годовой объем производства изделия (изделий, входящих в программу).

Конкретный состав и формы представления исходной информации для оценки ТР разрабатывает головная организация по оценке ТР.

В ходе проведения анализа указанной информации предлагают новые конструктивно-технологические решения (КТР) и выявляют технологические и конструктивно-технологические проблемы (КТП), связанные с производством изделий.

Результатом этой работы является перечень научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по решению выявленных КТП в части создания и освоения новых технологий. Для удобства перечень данных работ сводится в форму 1ТР (табл. 1).

Помимо новых технологий в ряде случаев возникает необходимость создания и освоения нового специального, сложного и уникального оборудования. В современных условиях, характеризующихся высоким уровнем развития мирового рынка станкостроения с широкой номенклатурой многокоординатного автоматизированного оборудования, имеются большие возможности для подбора необходимого оборудования. И только в случае отсутствия на рынке готового оборудования можно формулировать задачу по созданию специального оборудования. Результаты оценки потребности в таком оборудовании сводятся в форму 2ТР (табл. 2).

В планах и программах по технологической подготовке производства (ТПП), реконструкции и техническому переоснащению машиностроительного производства технологические работы обычно делят на разделы по видам производств. Пример такого деления приведен в табл. 3.

Расчеты потребности в специальных средствах технологического оснащения (ССТО) проводятся в основном для получения информации по двум вопросам: о потребных затратах на ТПП и об уровне загрузки цехов инструментального производства (ИП), которые будут изготавливать ССТО для изделий программы.

Таблица 1

Форма 1ТР

Перечень технологических НИОКР

№ п/п	Наименование НИОКР	Шифр изделия	Основание для проведения	Головной исполнитель (исполнители)	Сроки выполнения работ	Основные результаты, которые будут получены	Ориентировочная стоимость работ, тыс. руб.	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	...	...	...	...	...	...	...	...

Таблица 2

Форма 2ТР

Перечень специального, сложного и уникального оборудования

№ п/п	Наименование оборудования	Разработчик-изготовитель	Требуемый срок поставки	Цикл "разработка—производство", лет	Стоимость проектирования, тыс. руб.	Потребность в оборудовании, шт.	Ориентировочная стоимость оборудования, тыс. руб.	Источник финансирования	Всего затрат: гр. 6 + + гр. 7·гр. 8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	...	...	...	...	...	...	...	...	...

К ССТО для производства высокотехнологичных изделий относят: модели, кокили, опоки, штампы, пресс-формы, аппаратуру для входного контроля, испытательные стенды, контрольно-измерительную аппаратуру, приспособления (станочные и сборочные приспособления, тренажеры, ванны и т.д.), различный нормализованный инструмент (режущий, мерительный, сборочный и т.д.), предназначенные для производства только определенного изделия.

Для расчетов потребности в ССТО помимо указанных ранее исходных данных используют данные о сроках начала и об объемах производства изделий по годам программного периода, а также о производственных мощностях ИП и планах его технического переоснащения.

Потребные объемы ССТО желательно рассчитывать на весь период оснащения. Результаты расчетов сводят в форму 3ТР (табл. 4).

Расчеты загрузки ИП проводят по рабочей силе и оборудованию. Однако, как показывает анализ, в высокотехнологичных отраслях промышленности имеет место недостаточный уровень загрузки оборудования. В среднем коэффициент сменности работы оборудования составляет менее 1,5 в связи с дефицитом рабочих кадров, особенно в цехах ИП. Поэтому более точные данные по оценке ТР могут быть получены при проведении расчетов загрузки по рабочей силе (по показателю трудоемкости). С помощью данного показателя рассчитывают так называемые производственные возможности (ПВ) ИП предприятия. ПВ характеризуют объем его продукции (ССТО), измеряемый с помощью показателя трудоемкости (в сопоставимых с базовым периодом условиях), которая будет выпускаться в период оснащения производства изделий программы.

Таблица 3

Примерный перечень видов производства, применяемый при планировании технического переоснащения производства высокотехнологичной продукции машиностроения

Номер раздела, подраздела	Вид производства
1	Заготовительное производство
1.1	Литейное производство
1.2	Кузнечно-штамповочное производство
1.3	Листоштамповочное производство
1.4	Термическое производство
1.5	Производство деталей из металлических порошков и гранул
2	Механообрабатывающее производство
2.1	Обработка резанием
2.2	Производство деталей, получаемых электрофизическим и электрохимическим методами
3	Сварочное производство и производство методами пайки
4	Сборочное производство, контроль, испытания, монтаж и регулировка
5	Производство покрытий
5.1	Производство гальвано-лакокрасочных покрытий
5.2	Производство защитных покрытий
5.3	Производство термовакуумных и газотермических покрытий
5.4	Производство эмалирующих покрытий

Исходными данными для расчета ПВ являются:

- располагаемые ресурсы в расчете на год ($ПВ_j$);
- прирост ПВ за счет внедрения мероприятий по реконструкции и техническому переоснащению производства (как правило, до 7 % в год);
- ожидаемый ввод дополнительных производственных мощностей (оцениваемый также по трудоемкости).

Учитывая, что ТПП изделия осуществляется в течение нескольких лет, ПВ необходимо суммировать по годам, в течение которых изготавливают основную часть ССТО. При этом следует иметь в виду, что ко времени начала ТПП рассматриваемого изделия, которое наступит через T лет, производственные возможности ИП предприятия достигнут следующей величины:

$$ПВ_т = ПВ_0 \prod_{j=1}^{T} (1 + \Delta т_j + \Delta м_j),$$

где $ПВ_0$ — ПВ в год проведения расчетов ТР, тыс. н/ч;

$\Delta т_j$ — удельное снижение трудоемкости ИП в j-м году (в долях от ПВ);

$\Delta м_j$ — удельный прирост ПВ ИП за счет реализации мероприятий по реконструкции и техническому переоснащению производства или ввода новых производственных мощностей в j-м году (в долях от ПВ);

Предположим, что ТПП нового изделия начнется через T лет и будет проводиться в те-

Таблица 4

Потребные объемы работ по изготовлению спецоснастки головными заводами — изготовителями изделий, входящих в программу

Форма 3 ТР

№ п/п	Изделие	Предприятие-разработчик	Завод-изготовитель	Потребные объемы работ (тыс. н/ч)			Всего	Примечания
				2015	2016	2017		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	...	...	...	...	...	...	...	...
Итого: Планируемые общие объемы по изготовлению спецоснастки, тыс. н/ч . . . . . . Удельный вес работ по изготовлению спецоснастки для изделий программы в общем объеме производства, %								

чение t лет. Тогда суммарные ПВ за этот период составят:

$$ПВ_t = ПВ_T \sum_{i=1}^{t} \prod_{j=1}^{i} (1 + \Delta т_j + \Delta м_j).$$

На многих предприятиях, выпускающих высокотехнологичную многономенклатурную продукцию, составляют планы распределения мощностей ИП, в которых на оснащение новых изделий выделяется примерно 50 % мощностей ИП. Поэтому в качестве предельного примем коэффициент загрузки ИП ($K_{з.пр}$) в размере 0,5. Средний коэффициент загрузки ИП за время оснащения t $K_{t.ср}$ рассчитывают по формуле

$$K_{t.ср} = \frac{T_{ССТО}}{ПВ_t},$$

где $T_{ССТО}$ — потребность в ССТО для оснащения отдельного изделия за t лет, тыс. н/ч.

При необходимости могут быть проведены приближенные расчеты загрузки ИП по видам производства ССТО.

Результаты расчетов загрузки ИП предприятий-изготовителей изделий отражаются в заключении о ТР.

В случаях, когда $K_{t.ср}$ по изделию или по видам ССТО менее 0,5, работы по оснащению производства нового изделия будут выполнены в полном объеме и в заданные сроки. Кроме того, предприятие будет иметь резерв мощности для выполнения других работ. В противном случае потребный объем производства ССТО не обеспечивается ПВ ИП. В этом случае производят поиск дополнительных внутренних ресурсов (например, увеличивают коэффициент сменности работы оборудования) или внешних (передача изготовления части ССТО на сторону). Возможен также вариант увеличения сроков выполнения работ.

Информацию о трудоемкости изделий программы рассчитывают по действующим нормативам, приближенными методами или экспертным путем (по аналогам) и отражают в формах 4ТР (табл. 5) и 5ТР (табл. 6). Данную информацию используют для оценки производственных возможностей основного производства предприятий — изготовителей изделий по годам выпуска, измеряемой по показателю трудоемкости.

На основе информации, имеющейся в головной организации по оценке ТР и полученной от предприятий-смежников, специалисты (эксперты) головной организации проводят оценку ТР по следующим направлениям:

- оценивают номенклатуру определяющих техпроцессов изготовления узлов и агрегатов изделий и соответствующего оборудования (в том числе уникального), необходимого для изготовления изделий, и сопоставляют ее с располагаемыми возможностями предприятий-изготовителей. По результатам такого сопоставления разрабатывают мероприятия, которые необходимо осуществить для обеспечения технологической готовности предприятий-изготовителей к началу производства изделий в заданные сроки. При этом оценивают достаточность предлагаемых НИОКР по созданию или внедрению необходимых технологий и оборудования;
- оценивают необходимость и достаточность номенклатуры оборудования, заказываемого предприятиями, и возможных сроков его поставки с учетом возможности своевременного финансирования закупок, а также возможности его унификации с целью сокращения номенклатуры и использования для выпуска других изделий;
- проводят оценку потребных объемов производства спецоснастки в цехах ИП предприятий-изготовителей и оценку их загрузки для оснащения изделий программы;
- рассчитывают трудоемкость опытных и серийных изделий программы по годам производства и оценивают загрузку основного производства предприятий-изготовителей;
- дают предложения (при необходимости) по созданию специализированных производств и подготавливают для них соответствующие исходные данные;
- оценивают возможность изготовления изделий и (или) их агрегатов на кооперированных предприятиях в заданные сроки;
- при выявлении "узких мест" разрабатывают укрупненные планы организационно-технических мероприятий по их устранению.

Таблица 5

Форма 4ТР

Трудоемкость изделий, входящих в программу, с учетом кооперации

Наименование (шифр) изделия, комплекса	Наименование входящих изделий, систем	Трудоемкость изготовления по годам, тыс. н/ч					Головное предприятие-изготовитель
		2015	2016	2017	2018	2019	
1	2	3	4	5	6	7	8
...	...	...	...	...	...	...	..

Таблица 6

Форма 5ТР

Структура трудоемкости изделий по предприятиям

Предприятие-изготовитель	Наименование (шифр) изделия	Трудоемкость годового объема производства, тыс. н/ч				
		2015	2016	2017	2018	2019
1	2	3	4	5	6	7
...	...	...	...	...	...	...

Данные планы используют в дальнейшем при оценке ресурсной реализуемости.

Оценки ТР программы проводят в два этапа. На первом этапе необходимо проводить оценку ТР каждого изделия программы, начиная с самых ранних стадий его создания (НИР, техническое предложение, техническое задание). А затем при формировании программы проводят оценку ТР программы в целом независимо от стадий жизненного цикла, на которых находятся включаемые в нее изделия.

По результатам ТР формируют выходную информацию, которую сводят в формы 1ТР—5ТР, а также подготавливают отчет или пояснительную записку с соответствующими выводами и заключением о технологической реализуемости рассматриваемого изделия (программы).

Предложенная укрупненная методика оценки технологической реализуемости изделий и программ создания новой высокотехнологичной продукции позволяет повысить обоснованность оценки их ресурсной реализуемости на ранних стадиях создания в части объемов и сроков работ по технологическому обеспечению производства и снизить риски проектов.

При наличии вариантов инновационных проектов и программ данная методика позволит проводить их оптимизацию, т.е. выбирать из них наиболее экономичный вариант по критерию минимума потребных затрат с учетом ограничений по ресурсам и срокам реализации проектов и изделий или подготовки их производства.

Библиографический список

1. **Хоменко В.В.** Методические основы технико-экономического управления качеством высокотехнологичных инновационных проектов на стадии ТЗ // Радиопромышленность. 2014. Вып. 3. С. 103—109.

2. **Хоменко В.В.** Технологическая реализуемость конструкторско-технологических решений, направленных на повышение качества высокотехнологичной продукции // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 5. С. 25—27.

УДК 621.757

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

Устройство автоматизированной установки упругих колец во внутренние канавки деталей

Описана работа устройства автоматизированной установки упругих колец во внутренние канавки деталей.

The description of operation of the device of the automated installation is provided elastic rings in internal flutes of details.

Ключевые слова: упругое кольцевое уплотнение, автоматизированная установка, канавка.

Keywords: elastic ring consolidation, automated installation, flute.

Одной из главных проблем установки упругих кольцевых уплотнений в канавки внутренних цилиндрических поверхностей является исключение перекручивания кольцевого уплотнения вокруг оси сечения. Если при установке это произошло, то уплотнение разорвется при первой сотне срабатываний, что приведет к нарушению герметичности и выходу из строя устройства.

Известен ряд конструктивных решений [1—3] автоматизированной установки упругих кольцевых уплотнений в канавки внутренних цилиндрических поверхностей.

Авторы предлагают оригинальную конструкцию устройства, которая при опробовании показала надежную работу и качественную без перекручивания установку уплотнений в канавки.

Общий вид устройства для автоматической установки упругого кольца во внутреннюю канавку детали изображен на рис. 1; на рис. 2 — вид снизу на устройство при расположении механизма подачи над устройством в позиции сборки; на рис. 3 — вид сверху на корпус с магазином; на рис. 4 — вид на деформированное упругое кольцо в момент сбрасывания его в канавку детали (нумерация позиций на всех рисунках дана единая).

Устройство для автоматической установки упругого кольца 6 во внутреннюю канавку детали *1* содержит корпус *8*, механизм загрузки колец, который выполнен в виде ма-

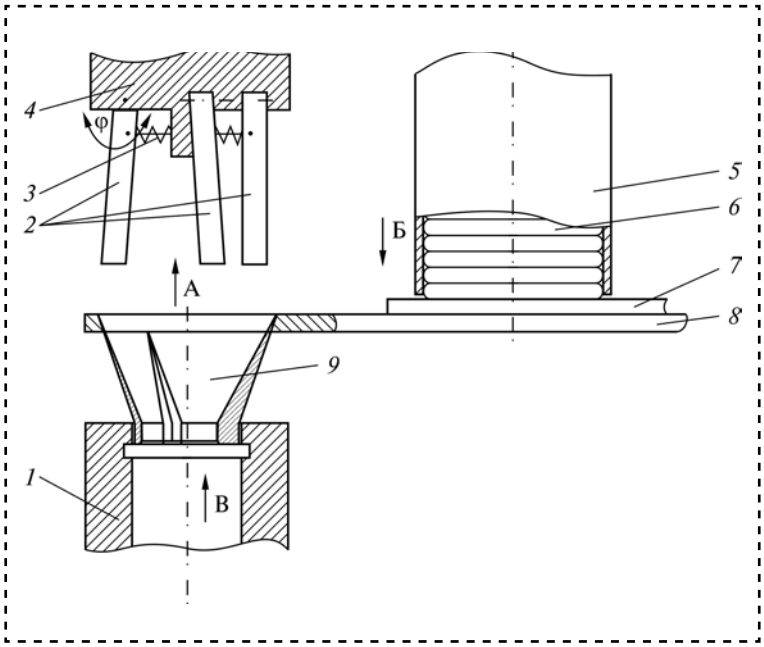


Рис. 1. Общий вид устройства для автоматической установки упругого кольца во внутреннюю канавку детали

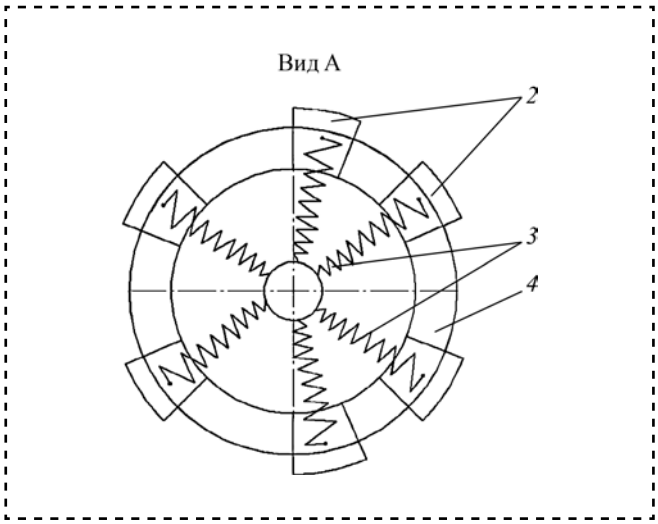


Рис. 2. Вид снизу на устройство при расположении механизма подачи над устройством в позиции сборки

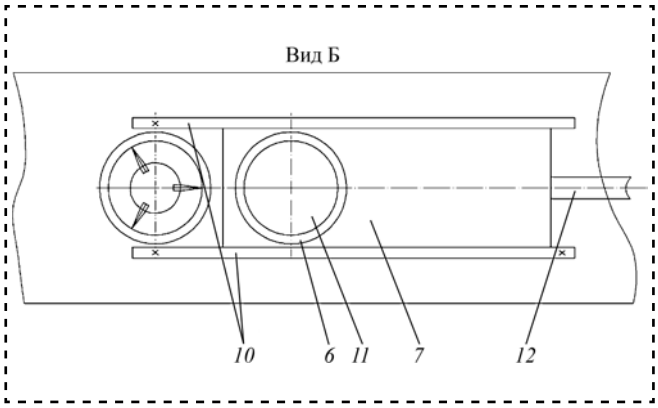


Рис. 3. Вид сверху на корпус с магазином

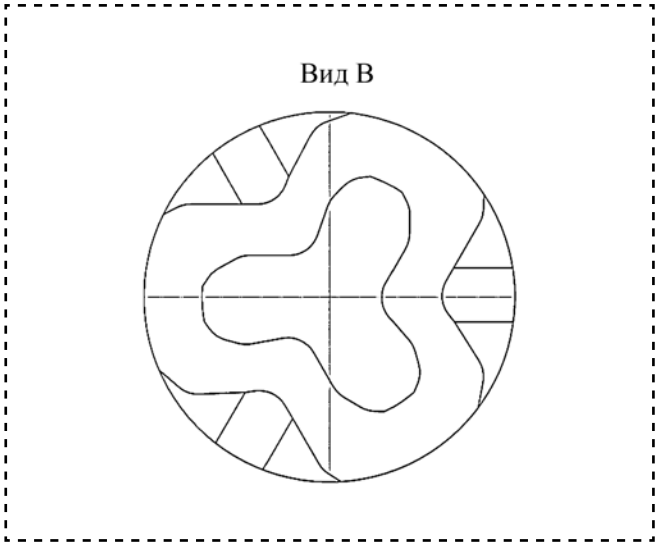


Рис. 4. Вид на деформированное упругое кольцо в момент сбрасывания его в канавку детали

газина *5* со штоком *12* и шибером *7* с цилиндрическим гнездом *11* под кольцо, втулку *9* для ориентации и подачи упругого кольца в деталь с выступами, механизм подачи *4* с шарнирно установленными рычагами *2*, поджатыми пружинами *3*. На корпусе *8* расположены направляющие *10*, в которых установлен шибер *7*.

Устройство работает следующим образом.

После заполнения магазина *5* упругими кольцами *6* деталь *1* подводится к втулке *9*, торец которой устанавливается у канавки детали. Шток *12* перемещает по направляющим *10* шибер *7* вместе с расположенным в нем упругим кольцом 6 и устанавливает его соосно втулке *9*. Упругое кольцо *6* из магазина *5* упирается в плоскость шибера. Механизм подачи *4* опускается, а шарнирно установленные рычаги *2*, поджатые пружинами *13*, проталкивают кольцо *6* во втулку *9*. По мере перемещения во втулке под действием рычагов *2*, упругое кольцо *6* при взаимодействии с выступами втулки *9* деформируется, уменьшая диаметр описанной окружности, причем деформированное кольцо *6* лежит в одной плоскости. При достижении деформированного кольца *6* внутренней кольцевой канавки детали кольцо *6*, выпрямляясь, занимает свое положение в канавке.

Механизм подачи *4* возвращается в исходное положение и одновременно деталь *1* отводится от втулки *9*, а шибер *7* возвращается в исходное положение, устанавливаясь соосно оси магазина *5*. Из магазина *5* под действием силы тяжести следующее упругое кольцо *6* выпадает в гнездо шибера *7*.

Библиографический список

1. **Переналаживаемый** автоматизированный комплекс сборки головки цилиндра трактора / Ю.З. Житников и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 7. С. 22—27.

2. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др. Под общ. ред. проф. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 656 с.

3. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Сборный автомат для установки колец в наружные канавки цилиндрических деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 7. С. 14—15.

4. **Автомат** для установки уплотнителей в специальные отверстия / Ю.З. Житников и др. А.с. № 1801724 СССР. МКИ В 23 Р 19/02. Бюл. № 10. 1993.

УДК 621.791.048

И.О. Бохоров, В.В. Карабанов, *канд. техн. наук*
Тел. 8 (915) 143-59-34

Пайка крупных массивных конструкций

Рассмотрены технологии и приемы пайки крупногабаритных конструкций, приведены технологические приемы, условия и материалы пайки, обеспечивающие получение равнопрочных с паяемым металлом конструкций.

The technology and techniques of soldering large structures, given technological procedures, conditions and materials soldering, providing reception of equal strength with the base metal structures.

Ключевые слова: обсадная колонна, трубопровод, крупногабаритная конструкция, автовакуумная пайка, наполнитель, плакирование, сорбент, магнитная пайка.

Keywords: casing, pipeline, large structure, autovacuum brazing filler, cladding, sorbent, magnetic rations.

В послевоенный период восстановления промышленности и создания новых отраслей были активизированы исследования и разработки по наиболее прогрессивным способам производства, в том числе по способу пайки, как наиболее эффективному способу создания монолитных соединений металлов. На основе результатов комплексных исследований разработаны эффективные принципиально новые технологии пайки промышленных конструкций, различные по техническим условиям выполнения и по механизму формирования паяных соединений.

Пайка выполнила ведущую роль в процессе развития промышленного производства. В связи с интенсивным развитием современных отраслей промышленности — металлургии, атомной энергетики, тяжелого машиностроения — возникала необходимость создания крупных паяных металлоконструкций. Расширяется область применения пайки. Она начинает применяться в полевых условиях, при монтаже крупных промышленных конструкций.

Этому способствовали два значительных технических достижений того периода. Впервые в мире в институте ВЗМИ (Москва) под руководством И.Е. Петрунина был разработан новый класс дешевых, высокопрочных припоев на железной основе [1], в частности, припой на железо-марганцевой основе марки П-87, обеспечивающий качественную пайку стальных изделий, собираемых с широкими сборочными зазорами (до 1 мм). Это достижение открывало широкие возможности для пайки крупных металлических конструкций, сборка которых с капиллярными зазорами затруднительна или невозможна.

Важнейшим техническим достижением явилось освоение промышленностью производства высокоскоростных и мобильных источников нагрева металлов — высокочастотных преобразователей.

С использованием этих достижений во многих ведущих институтах страны по трубопроводному строительству (ПКБ МИНЭНЕРГО СССР, ЦНИИТМАШ, ВТИ им. Дзержинского, ВЗМИ, АЗНИПИНЕФТЬ) проводили разработки по индукционной пайке трубопроводов разного назначения.

Особенно важное значение имела разработанная в АЗНИПИНЕФТЬ (г. Баку) совместно с ПКБ МИНЭНЕРГО СССР технология индукционной пайки протяженных обсадных колонн над устьем глубоких нефтяных скважин [2]. Попытки внедрения технологии сварки в среде углекислого газа обсадных колонн над устьем скважин, разработанной в ИЭС им. Е.О. Патона, оказались неэффективными ввиду зависимости качества сварного шва от химического состава металла труб и условий сварки.

Пайку обсадных колонн сечением 219×12 мм из стали различных групп прочности проводили с использованием опытной передвижной

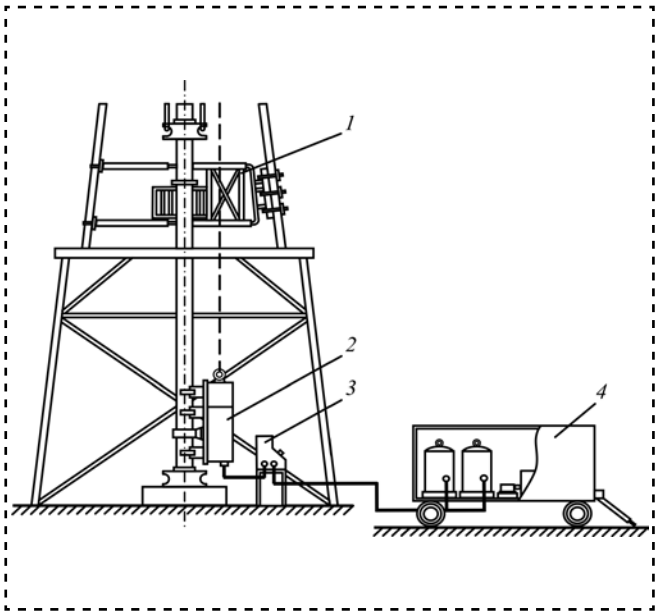


Рис. 1. Размещение индукционной установки на буровой: *1* — люлька; *2* — устройство для пайки труб; *3* — выносной пульт управления; *4* — генераторная станция

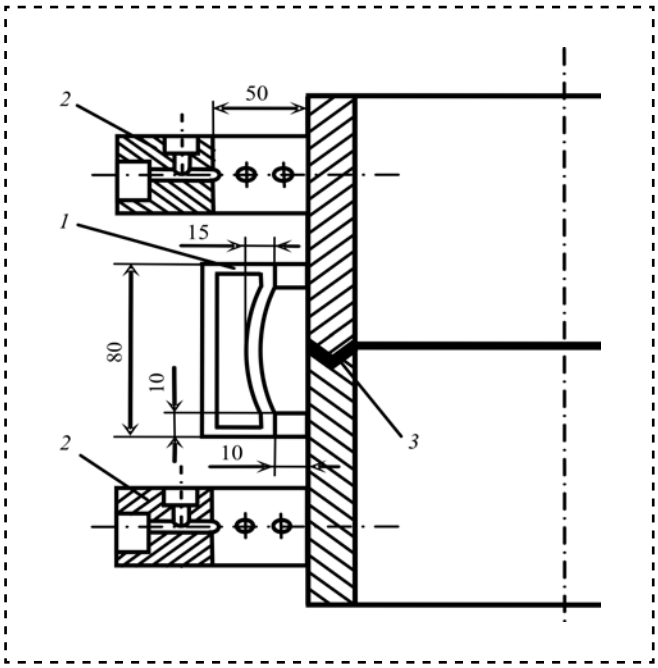


Рис. 2. Размещение индуктора (*1*) и спрейера (*2*) на паяемом стыке *3* обсадных труб

индукционной установки мощностью 100 кВт и частотой тока 8 кГц (рис. 1). В условиях трубно-инструментальной базы на торцах труб нарезали V-образные совмещаемые ответные разделки, между которыми, при стыковке труб помещали кольцо припоя. Кольца припоя изготавливали путем формирования из пасты, содержащей порошок припоя марки П-87 и раствор акриловой смолы БМК-5 [2]. Температура пайки составляла 1200 °С.

Спуски паяных обсадных колонн проводились впервые в мировой практике и показали технологические и экономические преимущества паяных соединений труб по сравнению с применяемыми до этого резьбовыми и сварными соединениями.

Над устьем скважины помещали нагревательное устройство (рис. 2), состоящее из трансформатора и индуктора, с вогнутой внутренней поверхностью, а также водовоздушный спрейер для принудительного охлаждения паяных стыков труб. Пайку проводили по заданному режиму, не приводящему к потере пластических свойств паяных соединений и металла труб.

Максимальная протяженность паяной колонны составила свыше 2000 м, а масса превысила 110 т. В процессе спуска колонны паяные соединения испытывали дополнительные инерционные и опрессовочные нагрузки. После опрессовки и цементации все колонны были сданы в эксплуатацию.

Разработанная технология индукционной пайки обеспечила повышение качества и надежности обсадных колонн, снизила стоимость бурения глубоких скважин.

Аналогичную технологию индукционной пайки применяли при монтаже промысловых трубопроводов на Новоуренгойском газоконденсатном месторождении (ГКМ), обеспечивая равнопрочность (рис. 3) и надежность паяных трубопроводов. При пайке применяли эффективный УЗ-контроль процесса пайки (по моменту расплавления припоя в соединяемом стыке) и качества паяных соединений, разработанный в МВТУ им. Н.Э. Баумана.

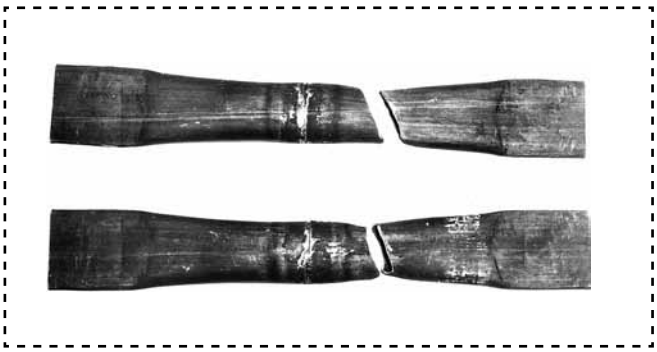


Рис. 3. Образцы паяных соединений труб после испытания на растяжение

Спуск паяных обсадных колонн, содержащих сотни паяных соединений (средняя длина трубы составляет 10 м), можно рассматривать как уникальные натурные испытания на прочность и надежность тяжело нагруженных паяных конструкций, которые подтверждают широкие возможности метода пайки по модернизации современного промышленного производства. Этому способствуют значительные ресурсы метода пайки по паяльным материалам, по технологиям и технологическим приемам проведения процесса пайки, накопленным за предшествующий период эффективного развития ее теории и практики. Во многих случаях пайка обладает преимуществами по сравнению со сваркой по качеству и надежности соединений.

Большое разнообразие разработанных технологий и технологических приемов проведения процесса пайки позволяет осуществить пайку конструкций практически любой сложности в разных производственных условиях: стационарных или путем доставки оборудования и средств пайки к стационарно установленным крупным конструкциям.

Одной из крупных, конструктивно сложных промышленных конструкций являются паровые котлы, в которых ремонт трубок экономайзеров и паронагревателей диаметрами 8...42 мм и толщиной стенок 4...6 мм из стали 20 с применением сварки затруднен ввиду их плотного расположения.

В ПКБ МИНЭНЕРГО СССР разработан технологический процесс экзотермической групповой пайки труб парового котла при их ремонте [3] с применением припоя на железно-марганцевой основе марки П-87. Пайка осуществляется с применением термических смесей после предварительной подготовки стыков. Стык собирают после подготовки разделок путем нарезания на концах труб ответных совмещаемых косостыковых разделок с углом скоса 30°. Между ответными разделками помещают припой. Нагрев соединения осуществляют с применением термических шашек.

Перед сборкой стыков на поверхность разделок наносят пасту на основе акриловой смолы, содержащую порошковый припой марки П-87, или же припой помещается между совмещаемыми разделками в виде предварительно изготовленного цельного кольца припоя. На собранные стыки труб устанавливают термитные шашки. Сборку осуществляют с приложением осевого усилия сжатия, составляющего 5 МПа. При температуре пайки (1150°С) в стыке протекает растворно-диффузионный процесс, в результате которого паяный шов насыщается компонентами паяемого металла, что дополнительно повышает прочность паяемого шва.

Размеры термитных шашек определяют исходя из типоразмера соединяемых труб. Прочность паяных соединений труб находится на уровне прочности сварных соединений.

Технология экзотермической пайки труб применена на Московской экспериментальной ТЭЦ-10 и ТЭЦ-11 Иркутскэнерго. Способ пайки эффективно применяется в металлургической отрасли.

В институте ИЭС им. Е.О. Патона были разработаны способы плакирования припоем тонких стальных листов путем наплавки слоя припоя на сутунку с последующей прокаткой полученной слоистой заготовки в тонкий лист. Нанесение толстых слоев заданной толщины и состава на основе металлургических технологических процессов проще и надежнее, чем нанесение тонких слоев с помощью всевозможных физико-химических процессов.

Для получения слоистых заготовок использовали два технологических процесса [4]. Первый из них предусматривает заливку расплавленного припоя в полость, образованную сутункой и технологической формой (рис. 4). Для получения прочного сцепления слоев в эту полость предварительно помещают легкоплавкий флюс. Всю сборку нагревают в печи до температуры, немного превышающей температуру плавления припоя. При заливке припой вытесняет расплавленный флюс из полости, а заполнивший ее припой надежно смачивает сутунку и технологическую крышку. После остывания образуется плакированная припоем заготовка с прочным сцеплением между слоями. Данный способ подобен способу тонкостенного литья и может применяться при использовании низко- и высокотемпературных припоев.

Этот способ не всегда обеспечивает получение достаточно плотного литого припоя из-за развития усадочной рыхлости в процессе кристаллизации.

Второй способ основан на электрошлаковой наплавке неподвижным электродом-при-

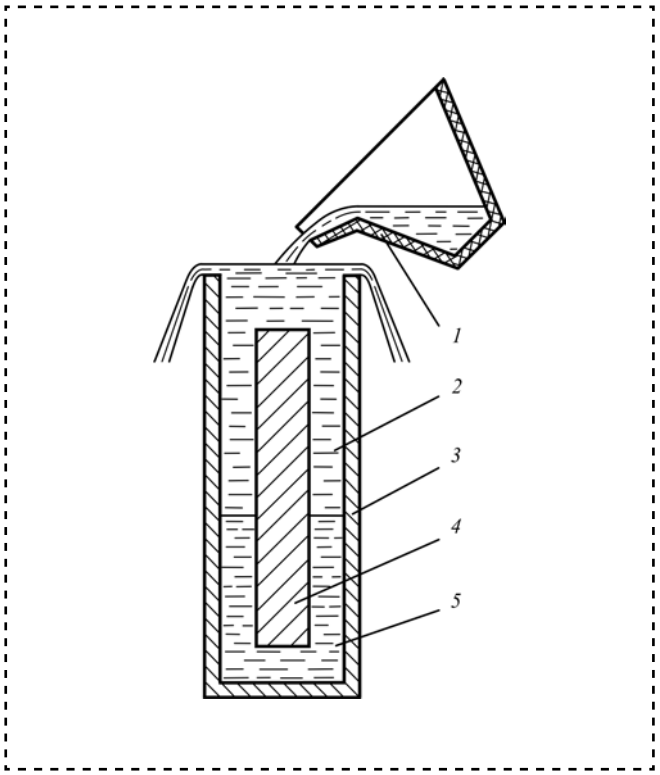


Рис. 4. Заливка расплавленного припоя:
1 — разливочный ковш с расплавленным припоем; *2* — жидкий шлак; *3* — технологическая форма; *4* — наплавляемая сутунка; *5* — жидкий припой

поем — а.с. № 332680 (рис. 5). В пространстве, ограниченном наплавляемой сутункой и формирующими поверхностями, создается ванна расплавленного шлака-флюса, в которую вводят плавящийся электрод. Электрод и наплавляемую сутунку подключают к различным полюсам источника питания. Электрический ток протекает между электродом и наплавляемой сутункой через ванну расплавленного шлака. В шлаковом расплаве, обладающем более высоким по сравнению с металлом омическим сопротивлением, поддерживается высокая температура, необходимая для плавления электрода и подогрева наплавляемой сутунки. Расплавляемый металл электрода стекает через шлак в металлическую ванну, при кристаллизации в которой образуется наплавленный слой.

Электрод, который изготавливают из припоя по форме и размерам, равным слою наплавленного металла, покрывают специальной изоляцией и собирают сутунку, электрод и формирующие детали. В процессе наплавки электрод остается неподвижным, а по мере его расплавления шлаковая ванна перемещается снизу вверх.

Способ, основанный на электрошлаковой наплавке неподвижным электродом-припоем, рекомендован для промышленного изготовления плакированного припоем листа. Он позволяет получить плакированный лист как с одной, так и с двух сторон.

Пайку эффективно применяют при производстве многослойных металлов. Между соединяемыми поверхностями листовых заготовок помещают тонкий слой специального припоя. Затем собранный пакет нагревают до температуры, превышающей температуру плавления припоя. При пайке на пакет может быть приложено внешнее давление. Прочность соединения слоев металла определяется прочностью прослойки припоя. Методом пайки можно получить многослойные заготовки с любым заданным соотношением слоев.

С применением пайки получают также промышленные металлические заготовки под

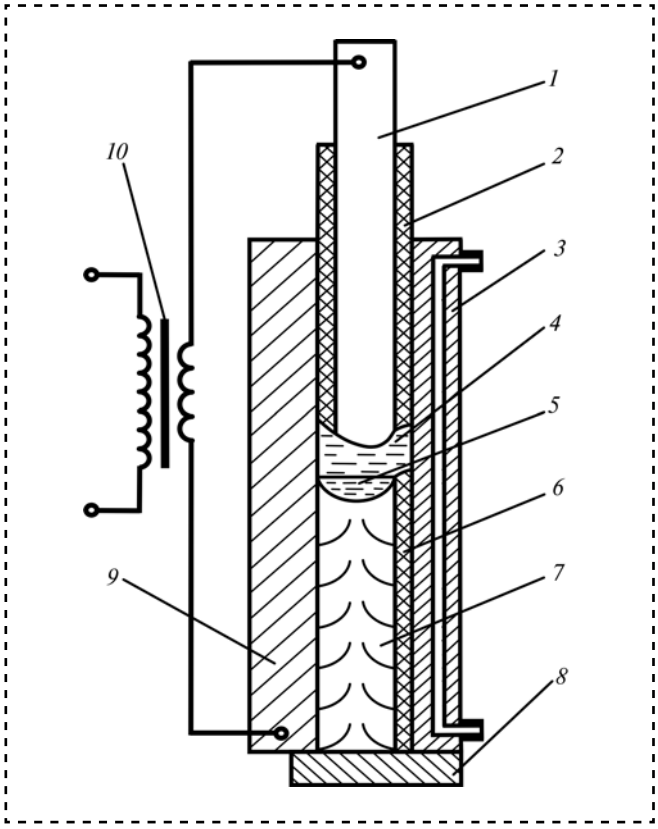


Рис. 5. Получение плакированной заготовки методом электрошлаковой наплавки неподвижным электродом (из припоя):
1 — электрод; *2* — изолирующее покрытие; *3* — водоохлаждаемый кристаллизатор; *4* — шлаковая ванна; *5* — металлическая ванна; *6* — шлаковая корка; *7* — наплавленный металл; *8* — поддон;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

прокатку [5]. Путем заливки жидкого металла (припоя) на поверхность твердого добиваются различной конфигурации многослойного слитка, получают плоскую заготовку под прокатку и прессование или трубную заготовку.

Например, подшипники скольжения изготавливают путем центробежного литья расплавленного баббита или алюминиевого сплава на внутреннюю поверхность цилиндрической стальной заготовки. В результате диффузионного взаимодействия жидкого и твердого металлов обеспечивается получение высокопрочного сцепления их слоев.

Многослойный металл отличается от сплава того же состава. В нем сохраняются специфические индивидуальные свойства составляющих его металлов, при этом многослойный металл обладает новыми, присущими только ему свойствами. Применение многослойных изделий в различных конструкциях позволяет экономить металл, повышает надежность и долговечность конструкции.

При нагреве стальных деталей на воздухе происходит их интенсивное окисление с образованием сложной оксидной пленки — продукта взаимодействия кислорода с железом. Кислород, растворяясь в поверхностном слое стали, образует твердый раствор кислорода в железе. На поверхности стали образуется слой закиси, растворимый при высоких температурах в железе. Если ограничить объем слоя воздуха над поверхностью детали, то по мере развития диффузии, при нагреве, концентрация кислорода и азота в этом слое воздуха будет уменьшаться.

Свойство нагретого металла сравнительно быстро растворять в себе оксиды и окислительные газы лежит в основе открытого в 1963 г. в ИЭС им. Е.О. Патона "автовакуумного эффекта" [6], при котором герметизированный между деталями зазор может полностью очищаться от кислорода и других, взаимодействующих с металлом, газов. При нагреве стальных деталей происходит диссоциация оксидов на поверхности и переход кислорода в твердый раствор с железом. Поэтому, если поверхность стальных деталей находится в ограниченном герметизированном сборочном зазоре с атмосферными газами, то по мере их растворения образуется вакуум, а соединяемые поверхности очищаются от оксидных пленок, что создает благоприятные условия для пайки.

В ИЭС им. Е.О. Патона проведены исследования и эксперименты по изучению автовакуумного эффекта, результаты которых были использованы при разработке способа автовакуумной пайки крупногабаритных стальных изделий [7, 8].

Общие закономерности автовакуумного эффекта изучали с применением герметичного контейнера, изготовленного из отрезков толстостенных труб, с установленным на нем манометром (рис. 6). В целях получения максимальной поверхности для быстрого поглощения газов в контейнер помещали рулон стальной ленты.

Было определено, что на начальной стадии нагрева контейнера происходит повышение в нем давления. Однако с увеличением времени и температуры нагрева давление снижается практически до нуля. С увеличением времени и температуры нагрева происходит уменьшение скорости роста давления. Такой характер барограммы обусловлен изменением состава атмосферы контейнера в процессе нагрева.

Исследования состава газов, остающихся в процессе неполного растворения, показали, что в металле вначале растворяется кислород и лишь затем происходит растворение азота. Инертные газы (аргон) в металле не растворяются. С увеличением содержания углерода в нагреваемом металле скорость очистки поверхности металла от окислов увеличивается.

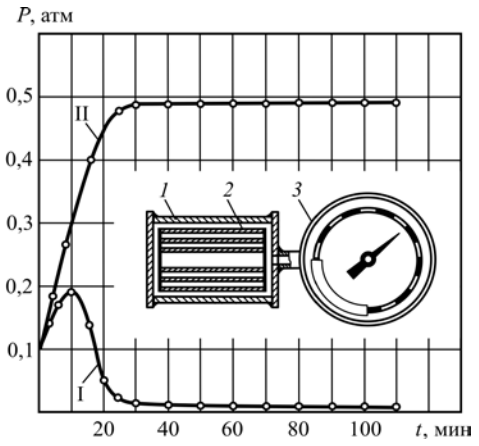


Рис. 6. Измерение давления в герметичном контейнере в процессе его нагрева:

I — контейнер с воздухом; II — контейнер с аргоном; *1* — сварной контейнер; *2* — стальная фольга; *3* — манометр

Степень поглощения азота металлом зависит от марки стали. Анализ барограмм показывает, что аустенитная сталь практически полностью поглощает кислород и азот. Перлитная и нелегированные стали азот поглощают частично. Остаточное давление в системе существенно меньше парциального давления азота в воздухе.

Процесс растворения атмосферных газов стальными деталями может протекать при любых температурах, в том числе и при комнатной. Однако скорость растворения, обусловленная диффузионной подвижностью газов в твердом металле, резко увеличивается с ростом температуры. Принято считать, что процесс растворения оксидов и образование вакуума достаточно энергично может протекать при температуре не ниже 1000 °С. Эту температуру следует считать началом процесса самопроизвольного растворения оксидной пленки на углеродистой и нержавеющей стали.

Активная реакция восстановления оксидов начинается при 600 °С и завершается при 900 °С. На безуглеродистых сталях оксидная пленка исчезает с поверхности при 950 °С в результате растворения кислорода в нагреваемом металле.

В условиях автовакуумного нагрева происходит более ранняя очистка металла, чем в вакуумной печи. Процесс очистки поверхности металла при автовакуумном нагреве равноценен процессу нагрева сталей в вакуумной печи с разряжением 10^{-4} Па.

Автовакуумный эффект является эффективным средством удаления газов и оксидных пленок в широком зазоре путем диссоциации и растворения кислорода в паяемых металлах в условиях герметичного зазора и нагрева до температуры пайки.

Если в герметичный сборочный зазор поместить припой, имеющий температуру плавления, превышающую температуру растворения атмосферных газов в металле, то при нагреве будет происходить автовакуумная пайка. При автовакуумной пайке создаются более благоприятные условия протекания процесса, чем при пайке в вакууме.

При автовакуумной пайке не происходит изменения химического состава припоя ввиду отсутствия его окисления и испарения элементов с высокой упругостью пара. Поэтому припои хорошо растекаются по паяемому металлу и заполняют зазор. Поскольку процесс пайки протекает в герметизированном зазоре, не возникает опасность вытекания припоя из него, что позволяет проводить качественную пайку и осуществлять более быструю и легкую сборку крупных конструкций.

Необходимость установки при сборке крупных изделий некапиллярных зазоров, имеющих большую протяженность и/или глубину, обусловлена их хорошей заполняемостью расплавом припоя при его затекании. Капиллярные зазоры не обеспечивают глубокого затекания расплава припоя в вертикальный зазор. Растворение паяемого металла в расплаве припоя приводит к резкому торможению процесса смачивания и к быстрому изменению состава припоя с последующей его изотермической кристаллизацией. Установлено, что даже в наиболее благоприятных условиях пайки глубина затекания расплавленного припоя в вертикальный зазор шириной 0,1 мм не превышает 130 мм. Нижний предел некапиллярного зазора должен превышать верхний предел капиллярного зазора — 0,5 мм.

Установлено, что при зазорах 0,5...1,0 мм обеспечивается глубина проникновения припоя более 2000 мм. Однако при увеличении зазора возрастает расход припоя и число усадочных дефектов в шве.

Для образования вакуума в сборочном зазоре необходима его надежная герметизация при температуре пайки (1000...1300 °С). Наиболее надежным способом герметизации является дуговая сварка.

Для крупных изделий автовакуумная пайка имеет большое преимущество, так как, обладая всеми достоинствами вакуумной пайки, она не требует для своего осуществления создания уникальных по размерам вакуумных печей. Пайку можно проводить без специальной защитной атмосферы и без применения флюса.

Наиболее простым вариантом технологии автовакуумной пайки является вариант, предусматривающий сборку деталей с необходимым зазором, обварку деталей по периметру дуговой сваркой, приварку накопительной камеры с припоем в верхней части сборочного зазора (рис. 7).

Собранную таким образом заготовку помещают в печь, нагревают до температуры пайки, выдерживают необходимое время при этой температуре, а затем охлаждают. В процессе нагре-

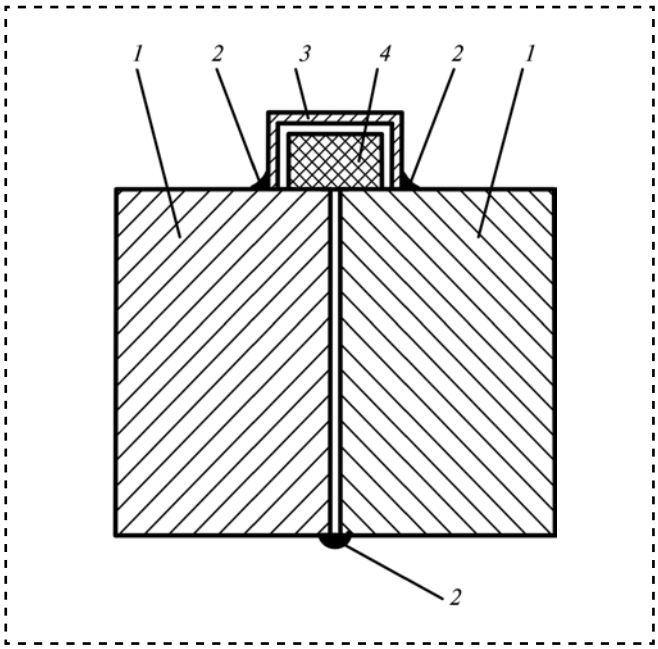


Рис. 7. Сборка деталей для автовакуумной пайки:
1 — паяемые детали; *2* — сварные швы; *3* — копильная камера; *4* — припой

ва до температуры пайки происходит растворение оксидов на соединяемых поверхностях и растворение атмосферных газов, находящихся в зазоре. После расплавления припой стекает вниз и беспрепятственно заполняет зазор.

При автовакуумной пайке применяют припои на медной, медно-никелевой, никелевой и железной основах. Практически можно применять любые припои, имеющие подходящую температуру плавления, без опасения, что среда вызовет неблагоприятные изменения в составе припоя. Однако припои должны иметь пониженную растворимость в железе и температура их плавления должна быть выше температуры начала интенсивного растворения газов в паяемом металле (1000 °С).

Верхний температурный предел для автовакуумной пайки обычно составляет 1300 °С. При более высоких температурах пайки возникает необходимость проведения термообработки паяной конструкции (закалка с отпуском или нормализация).

При выборе припоя для автовакуумной пайки крупных изделий необходимо учитывать возможную неравномерность нагрева по периметру формируемого соединения. В припое не должно содержаться элементов, снижающих температуру его плавления (С, В, Р), образующих при малой концентрации эвтектики с железом с низкой температурой плавления и с большой растворимостью паяемого металла.

Эффективно применение при автовакуумной пайке композитных припоев, представляющих собой смесь порошков припоя и металла или сплава с повышенной температурой плавления, не расплавляющегося при пайке. При кристаллизации паяного шва нерасплавившиеся частицы композитного припоя служат центрами кристаллизации. При этом, образующиеся мелкие усадочные дефекты равномерно распределяются по всему объему шва и не оказывают существенного влияния на его прочность и пластичность.

Разработка технологии автовакуумной пайки изделий сопровождалась изучением процессов, происходящих при автовакуумном нагреве паяемого металла.

В Тольяттинском государственном университете при разработке технологии автовакуумной пайки стальных изделий из стали Ст3 припоями на медной основе проводили исследование процесса автовакуумного нагрева при температурах 950...1000 °С. Исследования проводили на образцах в виде пакета с зазорами 0,5...5,0 мм (рис. 8). Скорость нагрева составляла 5...10 °С/мин. Давление измеряли мановакуумметром, соеди-

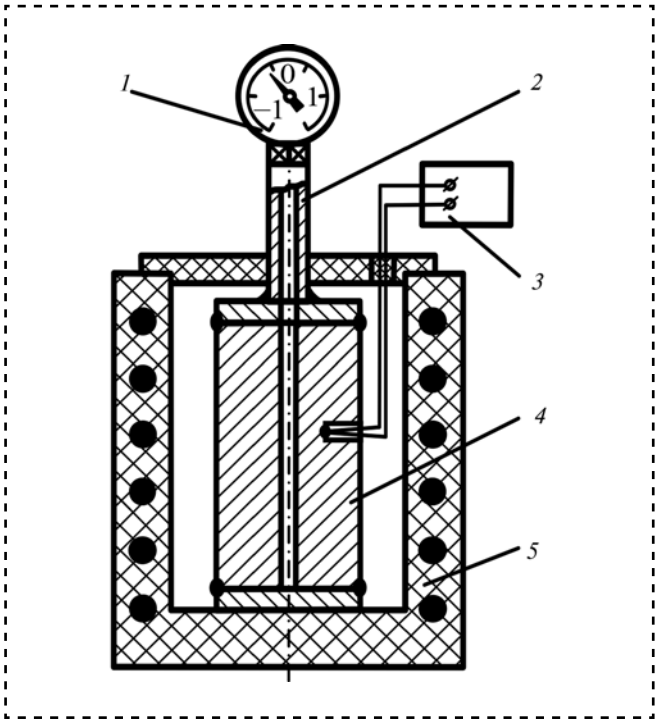


Рис. 8. Определение растворения атмосферных газов в основном материале:
1 — мановакуумметр; *2* — соединительная трубка; *3* — потенциометр с термопарой; *4* — пакетный образец; *5* — электропечь

ненным с пакетом стальной трубкой. В процессе нагрева определяли зависимость давления в герметичной полости от температуры и времени нагрева с построением барограммы.

Анализ обобщенной барограммы показывает, что в начале до температуры 380 °С в результате расширения газов давление в пакете растет до первой экстремальной величины (рис. 9, т. *1*). Затем начинается активный процесс связывания кислорода в оксиды железа, что резко уменьшает давление. Заканчивается этот процесс при температуре 680 °С (т. *2*). Одновременно с окислением идет тепловое расширение азота, а также процесс восстановления оксидов железа углеродом, диффундирующим из стали к границе раздела металл—оксид, сопровождающийся выделением CO и CO_2 и соответствующим ростом давления. Этот процесс совпадает с пиком давления азота при данной температуре и на барограмме соответствует третьей точке — 800 °С.

Дальнейшее повышение температуры приводит к новому спаду давления, вызванного α—γ-превращением в стали. При температурах структурных превращений способность металла абсорбировать азот скачкообразно изменяется в сторону уменьшения при переходе γ—δ. На барограмме этот процесс отмечается перегибом с экстремумом в т. *4*. С увеличением температуры давление в системе увеличивается за счет уменьшения растворения азота

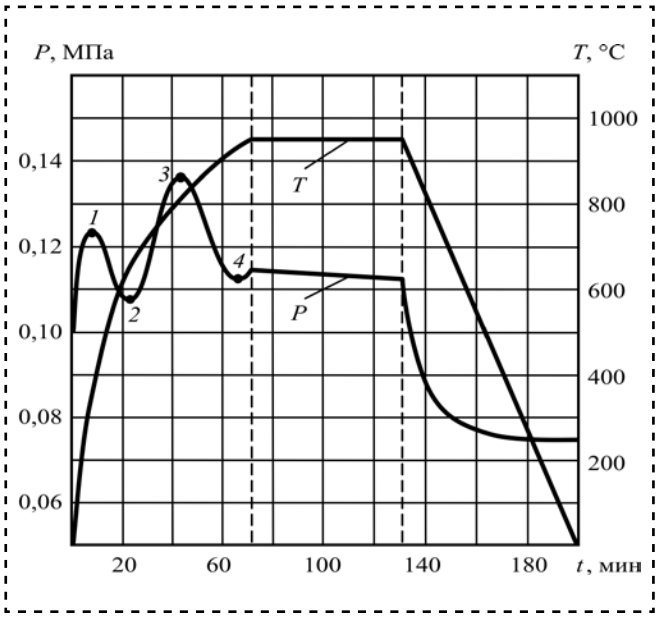


Рис. 9. Изменение давления в пакетном образце:
1—4 — экстремальные точки

в стали и теплового расширения других составляющих воздуха — аргона, влаги, которые не растворяются в паяемом металле во всем интервале температур от 20 до 1200 °С.

При температуре 950 °С производили изотермическую выдержку в течение одного часа. При этом, давление в системе несколько снижалось, что указывает на продолжающийся процесс растворения остаточных газов в стали.

Охлаждение пакета проводили на воздухе. Поверхность образцов после вскрытия имела серебристый цвет без видимых следов окисления.

Проверку возможности получения паяных соединений автовакуумным нагревом проводили при температурах ниже 1000 °С на нахлесточных образцах из Ст3. В качестве припоя применялась латунь Л62. Образцы собирали с паяльными зазорами 0,11 и 0,4 мм (по толщине фольги припоя). Температура пайки составила 950 °С, а время выдержки — 45 мин.

Изучение марко- и микроструктуры паяных соединений позволяет установить качество полученных соединений. Исследования показали, что автовакуумный нагрев обеспечивает получение качественных соединений при пайке малоуглеродистых сталей припоями на медной основе при температурах пайки ниже 1000 °С.

Применение автовакуумной пайки позволило решить серьезную задачу в атомной энергетике по созданию крупных надежных сосудов, плакированных нержавеющей сталью — транспортных контейнеров для хранения и перевозки отработанного топлива атомных электростанций [9]. Такие сосуды изготавливали биметаллическими с помощью наплавки ленточным электродом под флюсом. Технологический процесс наплавки антикоррозийного слоя из коррозионо-стойкой стали отличается большой трудоемкостью, низкой производительностью и плохими условиями труда. Качество наплавленного слоя не всегда соответствовало предъявляемым требованиям.

В ИЭС им. Е.О. Патона была разработана технология плакирования обечаек таких сосудов коррозионо-стойкой сталью с применением автовакуумной пайки [9]. Технология предусматривает: сборку деталей (обечайки с облицовочной заготовкой) с зазором 1 мм, герметизацию его сваркой, размещение порошкового припоя над зазором в накопитель-

ной герметичной камере, нагрев до температуры пайки, выдержку при этой температуре с последующим охлаждением без применения специальных сред или флюса. Температура пайки составляла 1100 °С. Разработанная технология была внедрена на предприятии "ЖдановТяжМаш", где производили автовакуумную пайку толстостенных обечаек (корпусов транспортных контейнеров ТК-10) с коррозионо-стойкой заготовкой. Пайку осуществляли в обычной печи, обеспечивающей равномерный нагрев изделия. Масса готовых сосудов составляла 100 т. Площадь паяного шва достигала 20 м^2. Технология обеспечивала высокое качество и надежное соединение.

Для автовакуумной пайки при 1100 °С в ИЭС им. Е.О. Патона разработан припой марки ПАН-7 на никель-марганцевой основе (ГОСТ 23861—79). Припой обладает высокими технологическими свойствами, имеет предел прочности 400 МПа и обладает высокими пластическими свойствами. Модификацией этого припоя является припой марки ПАН-7М [9]. Припои имеют однофазную структуру твердого раствора. Прочность паяных соединений при зазорах 0,8...1,0 мм составляет 360...460 МПа.

С применением автовакуумной пайки осуществляли плакирование коррозионно-стойкой сталью обечаек сосудов массой 11 т, диаметром 3600, высотой 2000 и толщиной стенки 65 мм. Толщина плакирующего слоя составляла 5 мм, а площадь паяного шва 22,5 м^2. Расход припоя на один сосуд составил около 8 кг.

С целью стабилизации механических свойств паяных соединений в зазоре размещают стальную сетку (диаметр проволоки 0,25...0,5 мм, размер ячейки 0,5...1,0 мм), что увеличивает поверхность взаимодействия и кристаллизации. При этом весь объем припоя в зазоре расчленяется на множество микрообъемов, ограниченных ячейками сетки.

Одновременно с плакированием толстостенного цилиндрического корпуса сосуда осуществляют и плакирование коррозионостойкой сталью и плоского днища сосуда [10]. В цилиндрической части днища выполняют кольцевой канал, в котором размещают бруски припоя. После укладки плакирующего листа и плакирующей обечайки производят сварку герметизирующих швов между плакирующими элементами и основным металлом. При этом, в сборочном зазоре размещают сетку из коррозионно-стойкой стали. После удаления из паяемой области воздуха перекрывают вакуумный затвор и собранный узел помещают в печь, где нагревают до 1200 °С. Прочность паяных соединений на срез достигает 370 МПа.

Аналогичная технология может быть использована при изготовлении биметаллических листов, идущих на изготовление бандажных валов прокатных станов, коленчатых валов, роторов турбин и других изделий.

Автовакуумная высокотемпературная пайка является практически безальтернативным способом плакирования коррозионо-стойкой сталью тонкостенных сосудов. Применение этого способа подтвердило возможности и необходимость использования широких и протяженных зазоров при пайке массивных конструкций.

В том же институте разработана технология высокотемпературной автовакуумной пайки мелкополюсной магнитной оснастки металлообрабатывающих станков, представляющей собой многослойные изделия, состоящие из чередующихся слоев магнитного и немагнитного материалов, соединенных между собой. В качестве магнитного материала применяется низкоуглеродистая сталь, в качестве немагнитного — аустенитная.

Технологический процесс изготовления станочной оснастки, основанный на высокотемпературной автовакуумной пайке, позволил решить проблему соединения отдельных слоев магнитного и немагнитного материалов в монолитный блок. Способ позволяет получать изделия высокого качества [9].

Паяемые детали очищают от оксидных пленок и собирают в специальном технологическом контейнере вместе с припоем. Контейнер герметизируют сваркой и нагревают до температуры пайки в обычной термической печи без специальной атмосферы. В зависимости от применяемого припоя температура нагрева составляет 1000...1050 °С. После охлаждения контейнер вскрывается.

Размеры плит станочной оснастки составляет — 1200×320×30 мм и 620×200×30 мм. Площадь пайки составляет от 0,5 до 2,0 м^2. Прочность шва, соединяющего низкоуглеродистую сталь с коррозионо-стойкой (12Х18Н10Т), достигает $\sigma_{ср}$ = 360 МПа.

Качество паяных изделий соответствует уровню лучших зарубежных аналогов. Метод позволяет изготавливать монолитную элек-

тромагнитную оснастку любых необходимых промышленных типоразмеров и форм.

Значительным достижением в области производства крупных промышленных конструкций явилось создание способа пайки с широкими сборочными зазорами, заполняемыми стальным порошковым наполнителем. Способ предусматривает заполнение широкого зазора (2 мм) композиционным материалом, состоящим из наполнителя в виде дискретных металлических не расплавляющихся при температуре пайки частиц и связки из припоя [11].

Раздельный выбор свойств наполнителя припоя открывает широкие возможности для управления свойствами паяного соединения, в первую очередь его прочностью и пластичностью.

При таком способе пайке целесообразно удалять малоактивные и не поглощаемые сорбентом газы. Поэтому необходимо наполнитель дегазировать в вакууме, а также вакуумировать зазор перед пайкой.

При данном способе широкий паяльный зазор с заполнившим его порошковым наполнителем герметизируют сваркой и соединяют с установкой предварительного вакуумирования (с камерой), содержащей сорбенты, с питателем, содержащим расплав припоя и с установкой нагнетания нейтрального газа (рис. 10).

Формирование паяного шва в широком паяльном зазоре с наполнителем значительно уменьшает, по сравнению с капиллярным зазором, влияние паяемого металла на химический состав металла шва, изменяет характер кристаллизации и позволяет активно управлять с помощью металлургических реакций структурообразованием. Специфика напряженного состояния в широком шве позволяет повысить пластические свойства стыковых соединений до уровня свойств паяемого металла.

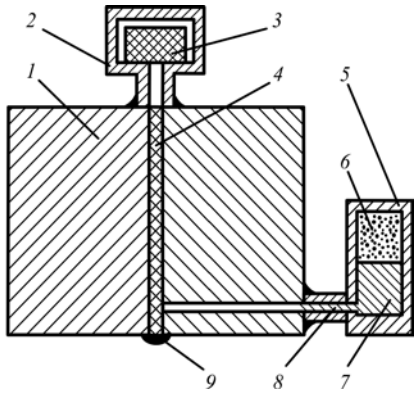


Рис. 10. Автовакуумная пайка крупногабаритной детали с некапиллярным паяльным зазором:

1 — деталь; *2* — сорбционный насос; *3* — сорбент; *4* — паяльный зазор с наполнителем; *5* — питатель; 6 — инертный газ; *7* — припой; *8* — соединительный канал; *9* — герметизирующий сварной шов

Увеличение ширины шва резко повышает ударную вязкость соединения и при размере зазора более 2 мм она достигает уровня паяемого металла. Стыковые паяные соединения углеродистых сталей с шириной шва более 2 мм характеризуются равнопрочностью с паяемым металлом при всех видах статических и динамических испытаний и могут применяться при изготовлении ответственных конструкций. Таким образом, применение целенаправленно создаваемого широкого паяльного зазора является новым направлением в области высокотемпературной пайки металлоконструкций, позволяющим в каждом конкретном случае выбрать композицию составов наполнителя и припоя, установить режимы и способ пайки, и как результат, получать соединения с заданными, в том числе высокими, свойствами.

В процессе пайки в паяльном зазоре протекают физико-металлургические процессы формирования паяного шва:

- очистка паяльного зазора от газообразных продуктов и оксидных пленок;
- формирование каркаса наполнителя, заполнение (пропитка) его расплавленным припоем;
- взаимодействие расплава припоя с наполнителем, кристаллизация жидкой фазы с формированием структуры, определяющей свойства паяного соединения.

В герметизированном зазоре присутствуют газы, заключенные в нем при его герметизации и выделяющиеся при нагреве наполнителя. В процессе нагрева до температуры пайки сорбент полностью поглощает кислород, частично азот и углекислый газ. Водород, пары воды, углеводороды и инертные газы сорбент не поглощает.

Заполнение некапиллярного зазора наполнителем и пропитка его расплавленным припоем, перемещающимся в зазор из вспомогательной камеры, препятствуют образованию усадочных дефектов при автовакуумной пайке крупных конструкций.

Нагрев в вакуумированном зазоре порошков на основе железа сопровождается активным выделением газов (при 600 °С), основную долю которых составляют CO и CO_2, образующиеся в результате восстановления оксидов железа углеродом. Активное газовыделение происходит при смачивании некоторых железных порошков расплавленным припоем. Чтобы ограничить газовыделение, изготовление порошкового наполнителя должно проводиться методом распыления расплавленным металлом в среде инертных газов.

Автовакуумный эффект для вакуумирования паяльного зазора при нагреве до 1000 °С может быть реализован только с применением активных сорбентов из порошка титана и марганца, поглощающих наряду с кислородом и азотом оксиды углерода (CO, CO_2). Продолжительность вакуумирования широкого паяльного зазора с наполнителем до достижения давления менее 5 кПа при протяженных размерах шва в значительной степени зависит от размера частиц наполнителя.

Технологически пригодным является наполнитель из малоуглеродистой стали и шарообразной формой частиц с размерами более 50 мкм, при наличии которого продолжительность вакуумирования зазора составляет несколько десятков минут.

Для пайки низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных сталей предложены наполнители марок ПРН24 и НПС-3, выпускаемые по ТУ 14-1-4409—88.

Для пайки сталей определены припои системы Cu—Mn—Ni, легированные молибденом, цинком, иттрием в зависимости от марки паяемой стали и наполнителя. В качестве основы может быть принят порошковый припой ВПР2, системы Cu—Mn—Ni (выпускаемый по ТУ 14-1-3143—83), легирование которого осуществляется в питателе в процессе пайки.

При нагреве наполнителя в вакуумированном паяльном зазоре происходит образование неподвижного каркаса при сращивании контактирующих поверхностей частиц. Сращивание частиц наполнителя из порошка на основе железа активизируется окислительно-восстановительным процессом на их поверхности. При заполнении зазора припоем каркас предотвращает перемещение частиц наполнителя под действием капиллярных сил или движущегося под давлением припоя, препятствуя образованию значительных локальных объемов припоя, вызывающих при кристаллизации усадочные дефекты.

Длина перемещения расплавленного припоя в наполнителе зависит, в основном, от растворимости наполнителя в припое и в значительной степени — от размера частиц. Для формирования швов большого сечения с наполнителем из порошка на основе железа необходима грануляция частиц более 100 мкм. Под действием капиллярных сил при пайке припоем на медной основе в вакууме можно сформировать качественный шов протяженностью до 500 мм от источника расплавленного припоя. Нагнетание расплавленного припоя давлением сжатого газа в вакуумированный широкий зазор с наполнителем позволяет переместить припой на расстояние до 2000 мм.

При изотермической выдержке под давлением в температурном диапазоне пайки частичное растворение наполнителя в расплавленном припое и диффузия элементов припоя в наполнителе приводят к исчезновению жидкой фазы в объемах между частицами и образованию металла шва без усадочных макродефектов при большой ширине паяльного зазора. Микропористость устраняется давлением 0,2...0,4 МПа на расплавленный припой, приложенным в процессе кристаллизации.

При взаимодействии частиц наполнителя с расплавленным припоем может происходить диспергация частиц. Под влиянием элементов с большим, чем у железа размером атома и элементов, активизирующих диффузию вакансий, при длительной изотермической выдержке размеры частиц наполнителя могут быть измельчены на 1,0...1,5 порядка, со 100...400 мкм до 5...20 мкм, с приданием сферической формы. Это приводит к образованию однородной структуры паяного шва и обеспечивает его равнопрочность с паяемым металлом.

Разработанная технология позволяет выполнять качественную пайку с получением швов шириной 2,5 мм и размером 250×1200 мм. Технология разработана для пайки многотонных коленчатых валов крупных компрессорных установок.

Известная трудность пайки чугунных изделий связана с наличием в структуре чугуна графита, что затрудняет смачивание поверхности паяемого металла расплавленным припоем. Для осуществления процесса пайки чугуна выжи-

гают графит окислительным пламенем, применяют электрохимическую обработку или специальный флюс, растворяющий графит.

Определено, что высокотемпературная пайка чугунных изделий с широкими сборочными зазорами, заполняемыми порошковым металлическим наполнителем, может проводиться без указанной предварительной подготовки чугунных деталей. Расплавленный припой, заполнивший такой зазор, может сформировать металл шва, обеспечивающий паяному соединению необходимые свойства [12].

По такой технологии паяли в условиях вакуума изделия из серого чугуна СЧ18-36 и разнородное соединение сталь 20 + чугун СЧ18-36. В качестве наполнителя применяли порошок железоникелевого сплава ПРН24, содержащий 24 % никеля и медные припои марок Л63, ВПр2, ВПр4, ПАН-3 и ПАН-9. При металлургическом анализе паяных швов чугунных изделий определена особенность образования шва при пайке чугуна и чугуна со сталью 20 при наличии в зазоре наполнителя.

Известно, что при пайке медными припоями сталей с разным содержанием углерода происходит рост столбчатых дендритов на поверхности стали с большим содержанием углерода. Этот рост активно протекает, когда зазор между поверхностями сталей с разным содержанием углерода меньше 0,1 мм, а разница в содержании углерода превышает 0,15 %. Рост дендритов продолжается до их сращивания с обеими поверхностями, что существенно повышает механические свойства паяного соединения. При пайке чугуна низкоуглеродистый наполнитель в паяльном зазоре создает необходимые условия для такого процесса.

Значительный градиент концентрации углерода между чугуном и наполнителем и минимальные зазоры между частицами наполнителя и поверхностью из чугуна обусловливают активный рост дендритов. Они образуются из низкоуглеродистого железоникелевого сплава, переходящего в расплав припоя при растворении наполнителя и углерода активно диффундирующего из чугуна.

При диффузии углерода из чугуна происходит активное растворение графитовых прослоек в расплаве припоя. При кратковременных выдержках графитовые прослойки остаются в шве. Увеличение длительности взаимодействия расплава припоя с чугуном до 20 мин приводит к растворению графитовых прослоек на глубину до 100 мкм. На место растворенных графитовых прослоек перемещается расплавленный припой, образуя плотный монолитный паяный шов, обладающий высокой прочностью.

При изготовлении крупных массивных изделий в заводских условиях на высокоточном оборудовании с высокой эффективностью может применяться капиллярная пайка.

Традиционно коленчатые валы изготавливали длительной и последовательной ковкой крупной массивной поковки на мощных ковочных прессах с использованием многочисленных штампов. С целью повышения эффективности процесса изготовления крупных коленчатых валов разработана технология их изготовления из отдельных заготовок, соединяемых между собой методом капиллярной пайки, основанной на активном растворно-диффузионном процессе взаимодействия расплавленного припоя с паяемым металлом [13].

Для эффективной капиллярной пайки крупных изделий был разработан универсальный эвтектический шестикомпонентный припой на медной основе ГФК (72...73 % Cu, 3...4 % Si, 4...5 % Ni, 5...7 % Fe, 5...6 % Mn, 6...8 % Zn) с температурой плавления 935 °С (а.с. № 91179, СССР). Эвтектический припой позволяет соединять самые различные по физико-химическим свойствам стали.

Выбор температуры пайки определяется в интервале 935...1300 °С. Эвтектический припой имеет высокую смачиваемость. Под действием капиллярных сил он активно проникает в самые узкие зазоры, образуемые при плотных прессовых посадках. Припой перед пайкой можно помещать над зазором. Зазор не должен превышать 0,04 мм. Припой ГФК самофлюсующийся и во многих случаях способен растворять оксидную пленку, даже такую устойчивую, как оксид хрома. При пайке на воздухе можно применять в качестве флюса обезвоженную буру, которая не только улучшает смачивание поверхности паяемого металла, но и является связующей при использовании припоя в порошкообразной форме.

Припой обладает высокой диффузионной способностью. При незначительной величине зазора он быстро изменяет свой состав, становясь более тугоплавким и, как следствие, после затвердевания — более прочным. С повышением температуры пайки диффузионный процесс в паяльном

зазоре усиливается. Таким образом, изменяя температуру пайки, можно регулировать механические свойства паяных соединений.

С применением припоя ГФК осуществляли капиллярную пайку (сборочный зазор до 0,04 мм) двухколенчатого вала длиной 4,5 м диаметром 110 мм с шатунными шейками [14]. Масса вала составила 500 кг. Вал собирали из пяти элементов: двух концевых и среднего цилиндрических (из стали 45) и двух заготовок колен из стали 20Х13, обработанных точением и фрезерованием. На рис. 11 показаны элементы, составляющие одно колено вала. На концах цилиндрических элементов вытачивают посадочные поверхности, а в заготовке колена выполняют цилиндрическое сквозное отверстие, которое затем в передней части протачивают, создавая внутреннюю полость (камеру). В полости заготовки колена сверлят вентиляционное отверстие.

В заготовку колена вставляют один из цилиндрических элементов и фиксируют его положение штифтом. В полость заготовки вводят смесь припоя и буры в соотношении 1:1. Затем в заготовку колена вставляют второй цилиндрический элемент и также фиксируют его положение штифтом.

Собранную заготовку одной коленчатой части вала нагревают в обычной пламенной печи до 1100 °С и выдерживают в течение 10 мин. Затем она охлаждается вместе с печью до 20 °С. Таким же образом изготавливают и соединяют вторую часть коленчатого вала. Паяное соединение двух частей образуется после нагрева всей заготовки при температуре 935 °С. Десятиминутная выдержка необходима для образования высокопрочного диффузионного соединения.

При перегреве припоя (до 1100 °С) протекает интенсивная диффузия компонентов припоя в металл соединяемых деталей и растворение в зоне шва соединяемых металлов в жидком припое, что приводит к дополнительному легированию припоя. При более высокой температуре глубина зоны взаимной диффузии увеличивается.

Колена формируют при окончательной механической обработке коленчатого вала. Шатунные щеки обтачивают и шлифуют после соответствующей термообработки.

Эксплуатация паяных коленчатых валов в течение длительного времени показала их высокую надежность.

Важное значение для работоспособности крупной конструкции имеют размеры галтелей паяных соединений (катет, радиус галтели). Галтели с небольшими размерами, особенно в угловых соединениях, являются концентраторами напряжений и при динамических и вибрационных нагрузках снижают усталостную прочность паяных соединений. Усталостная прочность таврового соединения, выполненного высокотемпературной капиллярной пайкой (независимо от состава припоя) почти в два раза ниже прочности монолитной или сварной конструкции, имеющей большую галтель.

Известно, что коэффициент концентрации напряжений зависит от толщины соединяемой детали S и радиуса R перехода поверхности шва к паяемому металлу. Равнопрочность соединения с паяемым металлом соответственно обеспечивается (при условии $K = R$) при соотношении $R = 2S$, где K — катет шва.

Получить в паяном соединении такую большую галтель можно искусственным путем, сформировав ее из металлического порошка [15]. Для этого в углу соединения с одной или с обеих сторон деталей (тавра) при сборке формируют из паяльной пасты галтель с необходимыми по условиям равнопрочности формой и размерами (рис. 12). Паста состоит из металлического порошка-наполнителя, связанного раствором сополимера. Собранную конструкцию нагревают в (вакуумной) печи при определенных условиях. Сополимер сублимирует, а в контакте между частицами наполнителя образуется диффузионное соединение, которое активизируется при восстановлении оксидной пленки углеродом.

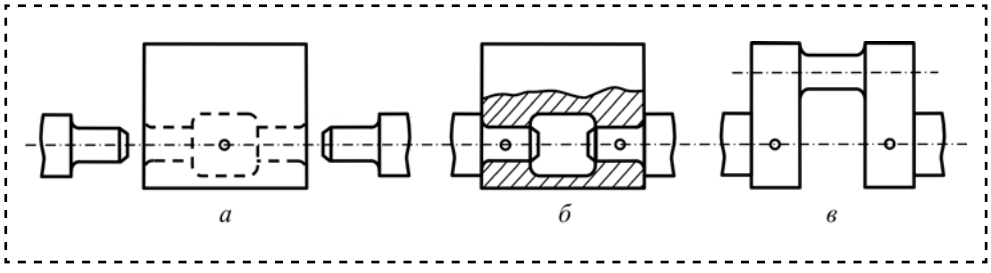


Рис.11. Схема сборки под пайку коленчатого вала

При определенном содержании углерода и

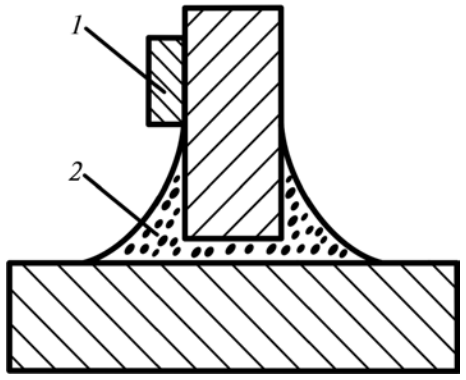


Рис. 12. Схема пайки таврового соединения с предварительным формированием галтелей:
1 — паяный шов; *2* — припой

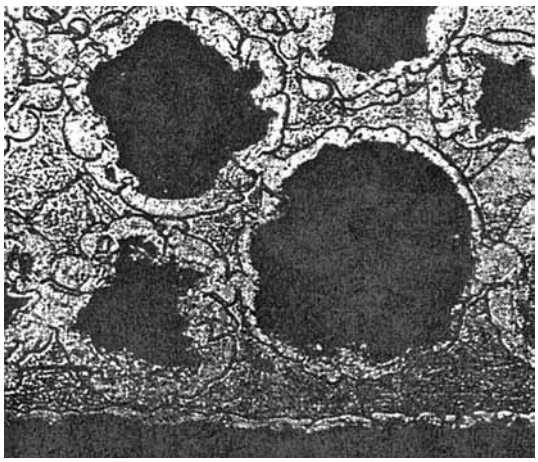


Рис. 13. Микроструктура каркаса из частиц наполнителя металла паяного шва (Х20)

кислорода в наполнителе можно получить прочный каркас из частиц наполнителя, соединенных между собой и с паяемым металлом (рис. 13). Такой каркас препятствует перемешиванию частиц наполнителя при его пропитке расплавленным припоем, устраняет возможность изменения формы и размеров галтели, предотвращает образование усадочных дефектов.

Припой располагают на стенке детали так, чтобы обеспечить равномерную пропитку наполнителя. Образующийся композиционный металл шва прочно соединяет детали. При этом формируется соединение с качественным сопряжением поверхностей шва и паяемой детали.

Определено, что плотный металл шва и высокие механические свойства соединений обеспечиваются при использовании специального наполнителя, изготовленного из железоникелевого сплава.

Библиографический список

1. **Пайка** металлов. Справочник / Под ред. Петрунина И.Е. М. Машиностроение. 200. С. 480.

2. **Дашдамиров Т.Д., Карабанов В.В.** Соединение обсадных труб в колонну индукционной пайкой // Сварочное производство. 1988. № 11. С. 8—10.

3. **Экзотермическая** пайка труб из стали 20 в условиях ремонта паровых котлов / Данилов Ю.П. и др. // Сварочное производство. 1987. № 7. С. 16—18.

4. **Городецкий А.Ш.** Плакирование высокотемпературным припоем тонколистовой стали. Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. семинара "Пайка и ее роль в повышении качества продукции и эффективности производства". М., 1976. С. 129—132.

5. **Король В.К., Гильденмеры М.С.** Основы технологии производства многослойных металлов. // Металлургия. 1970. № 3. С. 236.

6. **О растворении** газов воздуха в твердом металле в процессе самопроизвольной очистки его поверхности / Патон Б.Е. и др. // Доклады Академии наук СССР. 1975. № 9. Т. 98. С. 281—294.

7. **Патон Б.Е., Медовар Б.И.** О растворении газов воздуха в твердом металле в процессе самопроизвольной очистки его поверхности. // Доклады Академии наук СССР. 1968. № 1. Т. 181. С. 157—173.

8. **Автовакуумная** высокотемпературная пайка / Л.Г. Пузрин и др. // Киев: Знание, 1975. С. 18.

9. **Атрощенко М.Г.** Высокотемпературная автовакуумная пайка крупногабаритных изделий. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1988.

10. **Применение** пайки для плакирования плоских элементов / И.П. Серебрянник и др. // Сварочное производство. 1987. № 7. С. 18—20.

11. **Радзиевский В.Н.** Исследование физико-металлургических процессов, создание технологий и материалов для высокотемпературной пайки крупногабаритных конструкций при широких зазорах // Автореф. дис. ... д-ра тех. наук. М., 1990.

12. **Особенности** высокотемпературной пайки чугуна при широком паяльном зазоре с наполнителем / В.Н. Радзиевский и др. // Автоматическая сварка. 1997. № 12. С. 18—20.

13. **Головачев В.А., Елизаров Г.А.** Диффузионная сварка-пайка разнородных металлов. Л.: ЛОНТП, 1988.

14. **Головачев В.А.** Изготовление коленчатых валов без применения процесса ковки колен // Вестник машиностроения. 1989. № 4. С. 67—69.

15. **Радзиевский В.Н.** Высокотемпературная пайка в вакууме тавровых соединений с большой галтелью из металлического порошка // Сварочное производство. 1991. № 8. С. 5—7.

(Продолжение следует)

УДК 622.233

Р.А. Ковязин, **Ю.А. Лагунова**, *д-р техн. наук*, **К.П. Порожский**, *канд. техн. наук*
(Уральский государственный горный университет)
E-mail: Yu.Lagunova@mail.ru

Анализ бесприводных систем активного охлаждения рабочих жидкостей дебалансных высокочастотных вибраторов для мобильных буровых установок

Дан анализ конструкций высокочастотных вибраторов для бурения горных пород и рассмотрена технология охлаждения рабочей жидкости на примере фирмы Sonic.

In article the analysis of construction of high — frequency vibrators for drilling of rocks and considered technology of cooling of working liquid of the example company Sonic.

Ключевые слова: дебалансный вибратор, охлаждение рабочей жидкости, технология SonicSampDrill, цикл Стирлинга.

Keywords: debalance vibrator, cooling of working liquid, SonicSampDrill technology, cycle of Stirling.

Коэффициент полезного действия любой машины заведомо ниже, чем 100 %. Часть энергии преобразуется в тепло. В низкодинамических машинах проблему нагрева элементов решают пассивным охлаждением, например оребрением корпусов редукторов. В машинах с большими скоростями движения элементов и повышенными площадями трущихся поверхностей применяют активное охлаждение, примером которого может служить циркуляционная система двигателя внутреннего сгорания, включающая в себя масляный насос и радиатор.

При бурении с применением высокочастотной вибрации используют дебалансные вибраторы с электрическим и гидравлическим приводом высокой мощности, в частности, при использовании технологии "Sonic". Подобные системы относятся к высокодинамичным и доля энергии, переходящей в нагрев элементов машины и рабочей жидкости весьма велика. По статистике до 2/3 мощности машины, на которой установлен комплекс вибрационного бурения, расходуется на нагрев корпуса и дальнейшее его охлаждение. Поэтому вопрос охлаждения рабочей жидкости и корпуса рабочей машины также важен.

Под рабочей машиной следует понимать корпус вибратора, дебалансы, синхронизирующие устройства, мотор (или несколько моторов), приводящий дебалансы в движение. Под рабочей жидкостью следует понимать масло в гидромагистралях силового привода, а также, в ряде случаев, масло в корпусе машины, если оно не входит в циркулирующий поток гидросистемы.

Разработкой и производством высокочастотных вибраторов для бурения занимаются несколько фирм: SonicSampDrill (Голландия), Boart Longyear (США) и др.

В качестве примера рассмотрим дебалансный высокочастотный вибратор производства фирмы SonicSampDrill со следующими техническими характеристиками:

Расход жидкости при давлении 21 МПа, л/мин	85
Максимальное давление насоса, МПа	23
Максимальное давление в системе, МПа	21,5
Максимальный расход, л/мин	120
Мощность охлаждения при перепаде температур 30 °С, кВт	20

Тип масла . . . . . Biohydran SE46, Aerohydraulic 520
Тонкость фильтрации, мкм 10

В инструкции по эксплуатации написано, что работа вибратора без нагрузки допускается при длительности включения менее 20 с. Это обусловлено отсутствием полезной нагрузки и переводом большей части энергии в нагрев масла. По той же причине при работе под нагрузкой продолжительность бурения должна составлять не более 15 мин. При нарушении требований по времени работы возможен критический перегрев рабочих жидкостей и элементов конструкции.

В отличие от классической системы активного охлаждения, применяемой в машиностроении для редукторов и гидропривода, в нашем случае используют прогрессивную схему циркуляции масла.

В классической системе масло после гидронасоса проходит через магистрали и направляющую аппаратуру и после рабочей машины идет на слив через радиатор с принудительным обдувом. Далее масло снова попадает в бак. Цикл повторяется.

В системе, применяемой фирмой SonicSamp Drill, помимо радиатора в гидросистему встроены дренажный мотор и связанный с ним механической связью дренажный насос. Гидромотор установлен на корпусе вибратора и подключен последовательно к магистрали привода дебалансов.

Выходной вал гидромотора подсоединен к входному валу дренажного насоса. Дренажный насос откачивает нагретое масло из линий дренажа гидромоторов привода дебалансов и из корпуса вибратора. Таким образом, можно считать, что часть масла после приводных моторов попадает в корпус, омывает и охлаждает трущиеся части валков и подшипников, а затем откачивается дренажным насосом в сливную магистраль. Далее масло, как и в классической схеме, попадает в радиатор и идет в бак.

Активность работы дренажного насоса (а следовательно, и системы охлаждения) напрямую зависит от режима работы вибратора. При перегреве корпуса вибратор отключается и откачка горячего масла прекращается. Система охлаждения вибратора практически переходит в пассивный режим. Это является существенным недостатком системы.

Так как нагрев элементов вибратора носит локальный характер, то можно рассмотреть целесообразность применения активной системы охлаждения, работающей по циклу Стирлинга.

Такие машины хорошо изучены и обладают рядом особенностей:

1) полная герметичность — агрегат собирают на заводе, заправляют рабочей средой; статические уплотнения лучше работают, а герметичность защищает внутренние элементы от попадания грязи и преждевременного износа;

2) малые габариты — машины, работающие по циклу Стирлинга, имеют малые габариты при высокой удельной мощности благодаря применению свободнопоршневой схемы и рабочей среды под высоким давлением;

3) простота конструкции — наиболее простой является конструкция из трех деталей (поршень, вытеснитель, корпус);

4) большой температурный градиент между рабочими поверхностями — охлаждаемая часть может иметь температуру, близкую к абсолютному нулю, а нагреваемая ограничивается лишь свойствами материалов, из которых изготовлена холодильная машина;

5) гибкость конструкции — существует множество вариантов холодильных машин на цикле Стирлинга, в том числе с вращательным движением выходного вала или возвратно-поступательным движением корпуса.

Машины, работающие по циклу Стирлинга, обладают свойством обратимости. То есть машина может вырабатывать механическую энергию от перепада температур на нагревателе и охладителе как сама, так и переносить тепло от одного участка к другому при приложении механической энергии извне.

В нашем случае процесс работы машины в качестве двигателя не представляет интереса. Нам важна работа машины в качестве холодильного агрегата.

Опыт применения машин, работающих по циклу Стирлинга, значителен. В нашем случае, наиболее близкая конструкция — криогенераторы для сжижения газов, использующиеся в промышленности.

При использовании холодильной машины применительно к высокочастотным вибраторам для привода может быть использован как гидронасос (аналогично существующей схеме), так и механическая энергия рабочего блока: снятие крутящего момента с вала одного из дебалансов (жесткая кинематическая связь между поршнями холодильной машины и валом работающего дебаланса) и использование инерции при воздействии вибрации работающей машины.

Наиболее интересна и целесообразна конструкция, работающая от вибрации корпуса. Для этого в корпус встраивают (или монтируют на внешней его части) холодильную машину со свободным поршнем. Конструкция наиболее подробно рассмотрена в описании "двигателя Била".

Такая конструкция позволяет сократить занимаемое пространство увеличить надежность, так как свободный поршень (и вытеснитель) не связаны с подвижными элементами внутри корпуса.

Принцип работы конструкции следующий:

- дебалансы начинают вращение;
- вибрация корпуса передается на буровой инструмент;
- свободный поршень и вытеснитель начинают совершать возвратно-поступательное движение за счет сил инерции;
- холодильная машина начинает свою работу по циклу Стирлинга в режиме генератора;
- охладитель (участок холодильной машины, воспринимающий тепло от масла и элементов вибратора) уменьшает свою температуру и, следовательно, охлаждает рабочую жидкость;
- нагреватель увеличивает температуру и передает полученное от охладителя тепло в охлаждающую среду (воздух, вода, масло, хладагент и пр.);
- после прекращения вибрации (при условии, что температура охладителя больше температуры нагревателя) холодильная машина переходит в режим двигателя и превращает воспринимаемое тепло в механическую работу движения поршня (и насоса, если таковой есть).

Таким образом, даже после отключения вибратора и остановки всей буровой машины помимо пассивного охлаждения корпуса вибратора (нагрев окружающего воздуха) существует активное охлаждение за счет холодильной машины. Время работы такого охлаждения зависит от количества тепла, передаваемого от корпуса (масла) и может длиться несколько часов, ускоряя общий процесс охлаждения.

Поскольку процессы сжатия и расширения изотермические, то передаваемая холодильной машиной теплота Q равна производимой вибрацией работе P:

$$Q = P = \int p dV,$$

где P — полезная мощность;

p — мгновенное давление рабочего тела (газ или жидкость) холодильной машины;

V — мгновенный объем, занимаемый рабочим телом (газ или жидкость) холодильной машины.

Если

$$V = \frac{1}{2} V_E (1 + \cos \Phi),$$

где V_E — вытесняемый объем полости расширения;

Ф — угол поворота коленчатого вала, то

$$dV = -\frac{1}{2} V_E \sin \Phi d\Phi.$$

Если $p = p_{\text{ср}} \left[1 - \Delta \cos(\Phi - \theta) \right]$,

где $p_{\text{ср}} = p_{\max} \left(\frac{1 - \delta}{1 + \delta} \right)^{1/2}$ — среднее давление;

$$\Delta = 2\delta / \left[1 + \left(1 - \delta^2 \right)^{1/2} \right];$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{k \sin \alpha}{\tau + k \cos \alpha};$$

$$Q = -\frac{1}{2} \pi p_{\text{ср}} V_E \Delta \sin \theta. \qquad (1)$$

Тогда

$$\delta = A / B = \frac{\left(\tau^2 + 2\tau k\cos\alpha + k^2\right)^{1/2}}{(\tau + k + 2S)},$$

где $\tau = T_c / T_E$ — отношение температур (T_C — температура рабочего тела в полости сжатия; T_E — температура рабочего тела в полости расширения);

α — угол, на который изменение объема полости расширения опережает изменение объема полости сжатия (в радианах или в градусах);

S — приведенный мертвый объем, $S = 2X/(\tau + 1)$, здесь X — относительный мертвый объем, $X = V_D/V_E$;

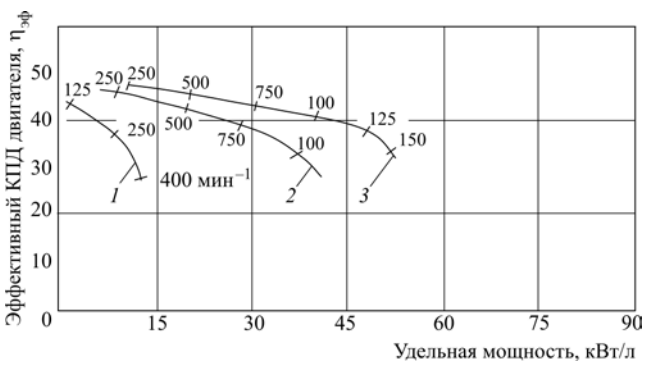


Рис. 1. Сравнительные характеристики двигателей Стирлинга с различными рабочими телами:
1 — воздух; *2* — гелий; *3* — водород

V_D — общий внутренний объем теплообменников, регенератора, соединительных каналов и отверстий (мертвый объем);

k — отношение вытесняемых объемов, $k = V_c/V_E$, V_c — вытесняемый объем полости сжатия.

Из формулы (1) видно, что производимая работа (а значит и мощность) холодильной машины прямо пропорциональна давлению рабочего тела и вытесняемому объему полости расширения.

Производительность работы холодильной машины может быть оценена безразмерным параметром хладопроизводительности $Q_м$, отнесенным к единице массы рабочего тела

$$Q_M = \frac{Q}{RT_C} = \frac{\pi\delta\sin\theta\left[1+\cos\theta\right]}{(1-\delta^2)^{1/2}\left[1+(1-\delta^2)^{1/2}\right]\left[\tau + \frac{k}{2}(1+\cos\alpha) + S\right]}.$$

Вторым показателем, который определяет параметры холодильной машины, является Q_{max} — безразмерная величина подводимой теплоты, отнесенной к максимальному давлению цикла и к общему вытесняемому объему:

$$Q_{max} = \frac{Q}{p_{max}V_T} = \frac{\pi(1-\delta)^{1/2}\,\delta\sin\theta}{(1+k)(1+\delta)^{1/2}\left[1+\left(1-\delta^2\right)^{1/2}\right]},$$

где Q — подводимая теплота в полость расширения;

R — газовая постоянная рабочего тела;

V_T — суммарный вытесняемый объем:

$$V_T = (V_c - V_E) = (1+k)V_E.$$

На практике это означает, что для повышения мощности и КПД холодильной машины первостепенную роль играют следующие факторы:

1) повышение давления рабочего тела;

2) уменьшение мертвого объема;

3) применение конструкционных материалов с предельно низкой и высокой теплопроводностью;

4) использование в качестве рабочего тела веществ с минимальной молярной массой.

Сравнительные характеристики двигателей с различными рабочими телами — воздухом, водородом и гелием приведены на рис. 1. График получен путем моделирования по усовершенствованной методике расчетов для одноцилиндрового двигателя Стирлинга мощностью 165 кВт.

Из рис. 1 видно, что наиболее эффективным рабочим телом является водород. Но его применение связано с рядом конструктивных трудностей (необходимо качественное уплотнение подвижных соединений). Также водород должен находиться под высоким давлением, а учитывая резкие температурные градиенты на элементах холодильной машины, существует опасность разгерметизации и взрыва. Альтернативу может представлять фреон, который достаточно доступен и хорошо себя зарекомендовал в рефрижераторных установках.

Конструкция холодильной машины имеет мертвый объем, который может быть значителен (рис. 2).

Сама по себе холодильная машина обладает малой мощностью и относительно низким КПД, но ее эффективность можно увеличить за счет объединения с дополнительными элементами:

- установкой плунжерного насоса малого расхода соосно с рабочим поршнем холодильной машины — такой элемент позволит не только наладить циркуляцию масла внутри корпуса вибратора, но и наладить принудительную смазку особо ответственных элементов (подшипники, пары трения, синхронизаторы) капельным путем или через форсунку. Такое решение является конструктивно необходимым для высокоскоростных деталей (в основном подшипников), так как в противном случае на частотах вращения 5000...12 000 мин$^{-1}$ начинается "масляное голодание". Тела качения перегреваются, уменьшаются зазоры между кольцами и возможно заклинивание подшипника или разрушение сепаратора;
- установкой водяного охлаждения на нагреватель. Известно, что вода кипит при температуре 100 °С. Температура нагревателя (с воздушным охлаждением) зависит лишь от отводимого количества тепла. Вода является отличным поглотителем тепла и не позволяет перегреваться холодильной машине, а следовательно, и вибратору в целом. Получаемый пар может просто выбрасываться в атмосферу, так как вода доступна.

Такая система не сможет полностью заменить используемую сейчас систему активного охлаждения радиатором, но она может понизить температуру наиболее ответственных элементов. Решение подходит для локального охлаждения и смазки.

При совместном использовании с имеющейся системой такое решение позволит повысить продолжительность работы всей виброустановки (как в холостую, так и под нагрузкой) и понизить рабочую температуру смазочно-охлаждающей и рабочей жидкостей, что положительно скажется на сроке жизни жидкостей и нагруженных узлов.

Перспектива использования подобных охлаждающих конструкций может выйти далеко за рамки буровых вибраторов. Основное направление развития — теплообменные аппараты со встроенным безприводным насосом циркуляции смазки для редукторов вращателей, гидромуфт и прочих агрегатов, где требуется отводить большое количество тепла и принудительно смазывать подшипниковые узлы и пары трения. Система применима для таких машин, в которых габариты играют первостепенную роль, а установка крупной системы рассеяния тепла невозможна.

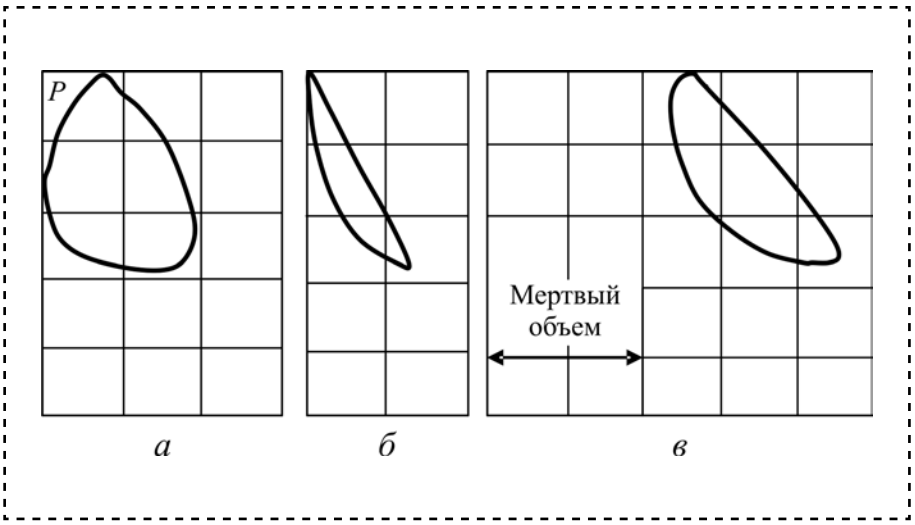


Рис. 2. Действительная *pV*-диаграмма двигателя Стирлинга:
а — диаграмма полости расширения; *б* — диаграмма полости сжатия; *в* — диаграмма суммарного объема

РАЗНОЕ

УДК 621.744.37

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева**, *канд. экон. наук*
(Московский государственный университет приборостроения и информатики),
О.Е. Железникова, *канд. техн. наук (Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск)*
E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

Системы обеззараживания ультрафиолетом

Приведены системы обеззараживания воды, воздуха и поверхностей на основе ультрафиолетового излучения. Показаны различные виды систем и способы обеззараживания. Представлены основные параметры и технические характеристики облучателей типа "СВЕТОЛИТ". Показана сборка общего вида облучателя и основные его элементы.

The system of disinfection of water, air and surfaces from ultraviolet radiation was described. Shows the different types of systems and methods of decontamination. Presents the basic parameters and technical characteristics of the irradiators type" SVETOVIT". Shows the Assembly of the General form of the irradiator and its main elements.

Ключевые слова: облучатель, ультрафиолетовая лампа, вода, воздух, поверхность.

Keywords: irradiation, ultraviolet lamp, water, air, surface.

Система обеззараживания ультрафиолетом предназначена в основном для снижения микробной обсемененности воды [1] или воздуха [2, 3]. Метод обеззараживания воды ультрафиолетовым (УФ) излучением получил широкое распространение в последние 20 лет [4].

Одной из основных мотиваций применения этого метода послужил обнаруженный факт, что хлорирование воды приводит к образованию опасных для здоровья людей побочных продуктов. Вторым важным фактором в продвижении УФ-технологии явилась недостаточная эффективность хлорирования в отношении ряда микроорганизмов. УФ-обеззараживание оказалось идеальным решением обеих этих проблем, что и стало причиной бурного развития УФ-технологии во всем мире.

Свет, воспринимаемый глазом человека, составляет лишь часть спектра электромагнитного излучения. Свойства электромагнитного излучения определяются длиной волны в нм. Ультрафиолетовым излучением называется электромагнитное излучение с длиной волны от 100 до 400 нм. Для обеззараживания используют биологически активную область спектра УФ-излучения с длиной волны от 205 до 315 нм, называемую ***бактерицидным излучением***. Максимальная эффективность инактивации микроорганизмов наблюдается в диапазоне волн 250...270 нм: на этот участок спектра приходится длина волны, генерируемая УФ-лампами низкого давления — 254 нм. Доза УФ-облучения, которая является основным критерием эффективности обеззараживания, измеряется на длине 254 нм [4].

Обеззараживающее действие ультрафиолета основано на необратимых повреждениях дезоксирибонуклеиновой (ДНК) и рибонуклеиновой (РНК) кислот. Нуклеиновые кислоты содержатся во всех клетках живых организмов и являются носителями наследственной информации. При размножении микроорганизма происходит удвоение молекулы нуклеиновой кислоты. УФ-излучение на длине 254 нм эффективно поглощается нуклеиновыми кислотами. В результате УФ-воздействия в структуре нуклеиновых кислот образуются сшивки, которые делают невозможным удвоение ДНК и РНК, следовательно, невозможным и размножение микроорганизма. Инактивированный таким образом микроорганизм не представляет опасности для живых организмов.

Бактерицидный ультрафиолет избирательно действует только на микроорганизмы, не оказывая воздействия на химический состав среды, что имеет место при использовании химических дезинфектантов.

Используемые для обеззараживания амальгамные лампы представляют собой УФ-лампы низкого давления, в которых вместо ртути использована амальгама. Амальгама — это жидкие или твердые сплавы ртути с другими металлами. Ртуть в сплавах не представляет опасности для человека и окружающей среды. При производстве источников УФ-излучения используют амальгаму на основе сплава ртути с висмутом, индием и свинцом. Такие лампы имеют большую интенсивность, длительный срок службы и высокий КПД.

Обеззараживание ультрафиолетом воздуха и поверхностей до недавних пор имело ограниченное распространение в медицинских учреждениях и других специализированных областях, в которых предъявляются повышенные требования к микробиологическому составу воздуха. В последние годы в связи с высокой концентрацией людей в городах обострилась проблема эпидемий заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. В связи с этим возрос интерес к обеззараживанию воздуха в различных общественных учреждениях, на предприятиях и местах массового скопления людей [2, 3].

Системы УФ-обеззараживания воздуха и поверхностей применяются в общественных зданиях и помещениях (детские сады, школьные классы, вокзалы, метро, офисы и пр.) с целью снижения заболеваемости инфекционными болезнями. Такие системы могут быть встроены в общую систему вентиляции воздуха или установлены локально в помещениях. Применение УФ-обеззараживания в системах центральной вентиляции и кондиционирования позволяет предотвратить заражение воздуха возбудителями легионеллиоза, размножающимися в системах вентиляции [3].

В медицинских учреждениях (поликлиники, больницы, операционные) обеззараживание воздуха и поверхностей ультрафиолетом применяют для предотвращения перекрестного инфицирования и снижения риска развития инфекционных осложнений.

Из всего обилия систем обеззараживания воздуха наиболее новой и перспективной является система, устанавливаемая в приточную вентиляцию и систему кондиционирования зданий.

Несколько российских компаний уже активно изготавливают системы обеззараживания воздуха для вентиляционных систем.

В частности, компания ООО "Промышленные системы УФ-обеззараживания" производит установку серии ОДВ-1000 производительностью 1000 м^3 воздуха в час. Компания НПО "ЭНТ" производит установку УОВ-1000 производительностью 1000 м^3 воздуха в час. Установки работают на УФ-лампах мощностью 75 Вт производства компании Philips.

Компания ООО ПК "ЛИТ" производит установку "МЕГАЛИТ" производительностью 1700 м^3 в час. Данная установка интересна тем, что в ней использованы амальгамные УФ-лампы мощностью 300 Вт. Такие лампы способны более эффективно обеззараживать воздух, проходящий через установку. В случае разбиения УФ-лампы в воздух не попадают пары ртути, так как лампы наполнены инертным газом, а ртуть находится в связанном состоянии (индиевая амальгама).

Для обеззараживания воздуха и поверхностей помещений с повышенными требованиями к микробиологической чистоте: предприятий пищевой, фармацевтической и косметической промышленности с целью снижения количества содержащихся в воздухе и на поверхностях микроорганизмов и профилактики инфекционных заболеваний в отсутствии людей применяют облучатели типа "СВЕТОЛИТ". Климатическое исполнение облучателя — УХЛ, категория — 4.2 по ГОСТ 15150—69 при температуре окружающего воздуха в интервале от 10 °С до 35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при температуре 25 °С [3].

Параметры и технические характеристики облучателей представлены в табл. 1.

Общий вид облучателя показан на рис. 1.

Облучатель изготовлен из коррозионно-стойкой стали и состоит из основания *1*, крышки *7* и защитной решетки *2*. Решетка крепится к основанию посредством усиков, которые входят в отверстия в основании. Чтобы снять решетку нужно слегка разогнуть ре-

Таблица 1

Параметры и технические характеристики облучателей "СВЕТОЛИТ-100Н" и "СВЕТОЛИТ-50Н"

Показатель	"СВЕТОЛИТ-100Н"	"СВЕТОЛИТ-50Н"
Тип УФ-лампы	Амальгамная АНЦ 300/144-П2 VOSUV	Амальгамная АНЦ 170/70-П2 VOSUV
УФ-облученность на расстоянии 1 м, не менее, Вт/м^2	7	4
Масса облучателя, кг, не более	4,3	3,3
Потребляемая мощность, Вт, не более	300	170
Бактерицидный поток на начало срока службы, Вт	100	50
Габаритные размеры, мм, L×H×B	970×87×244	590×87×244
Тип балласта	Электронный ЭПРА Л~220-1(95-145)-2202-184	
Напряжение питания, В	220 ± 22	
Частота питающего напряжения, Гц	50...60	
Род тока	Однофазный	
Количество ламп, шт.	1	
Срок службы УФ-лампы, не менее, ч	12 000	
Число включений/выключений УФ-ламп в течение срока службы, не более, раз	5000	
Время выхода УФ-лампы на режим, мин	2	

шетку так, чтобы усики вышли из отверстий. На основании, на стойках установлена УФ-лампа *3*, электронный пускорегулирующий аппарат (ЭПРА) *6*. В боковой стенке крышки *7*, закрывающей ЭПРА, расположен кабельный ввод *5*. Подключение УФ-лампы к ЭПРА осуществляют при помощи ламповых разъемов *4*. В основании имеются четыре отверстия для закрепления облучателя на стене или на потолке.

Электрическая схема облучателей показана на рис. 2.

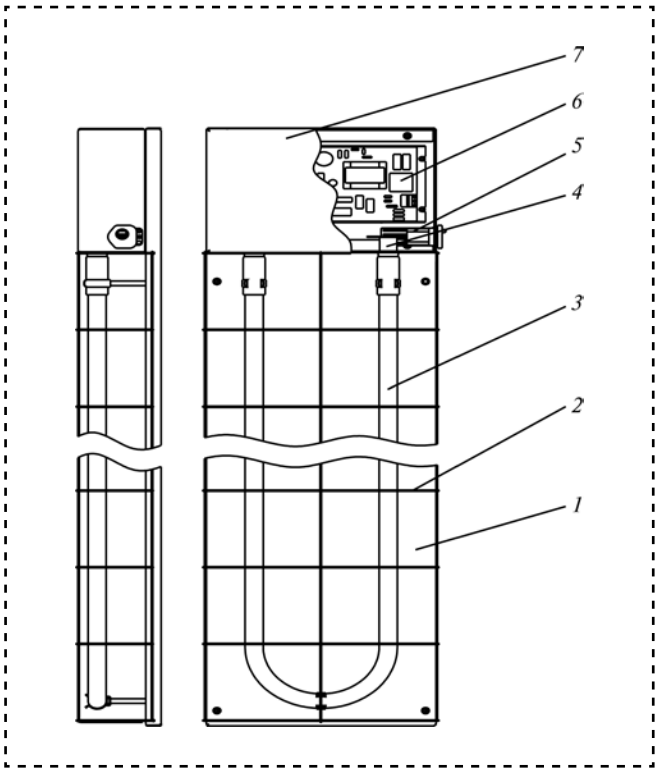
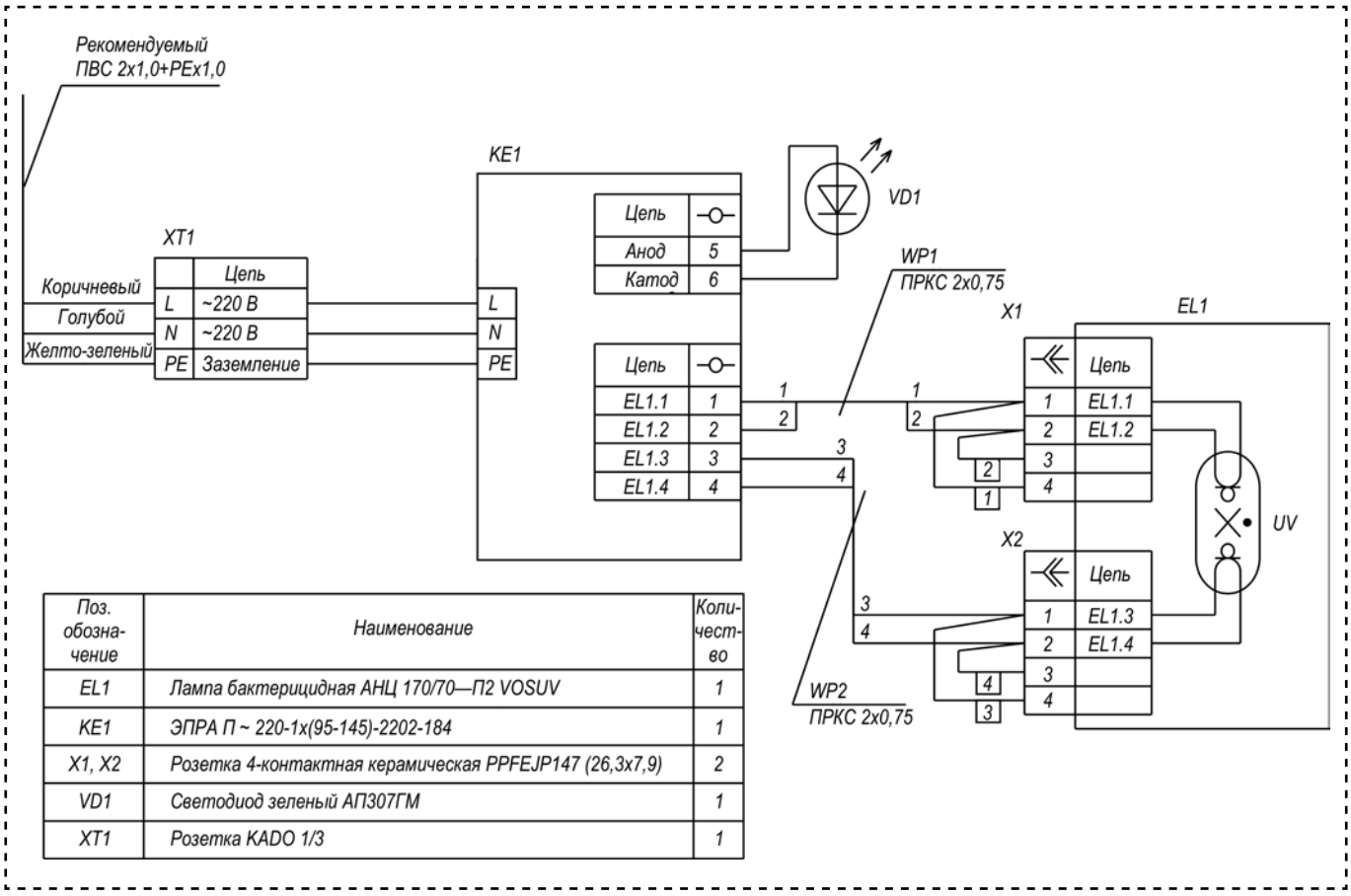


Рис. 1. Облучатель "СВЕТОЛИТ"

Эксплуатация облучателя должна осуществляться с соблюдением мер безопасности, а также с учетом требований для облучателей открытого типа согласно Р 3.5.1904—04 Минздрава РФ "Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях".

Облучатели открытого типа предназначены для обеззараживания помещений только в отсутствие людей. На облучатель распространяются все требования по правилам безопасности при эксплуатации электрооборудования, питание которого осуществляется напряжением 220 В и частотой 50...60 Гц. При необходимости оперативного контроля работы облучателя в помещении необходимо применять средства индивидуальной защиты от УФ-излучения (УФ-защитные очки и маска, х/б перчатки, х/б халат с капюшоном, полностью закрывающий открытые участки кожи).

Стены и потолок в помещениях, которые подвергаются обработке облучателями, должны быть выполнены из материалов, устойчивых к УФ-излучению. Перед началом работы необходимо убедиться в отсутствии людей, животных, живых растений в помещении.



Поз. обозначение	Наименование	Количество
EL1	Лампа бактерицидная АНЦ 170/70—П2 VOSUV	1
KE1	ЭПРА П ~ 220-1х(95-145)-2202-184	1
X1, X2	Розетка 4-контактная керамическая PPFEJP147 (26,3х7,9)	2
VD1	Светодиод зеленый АП307ГМ	1
XT1	Розетка KADO 1/3	1

Рис. 2. Электрическая схема облучателей

Во время проведения сеанса облучения над входом в помещение следует включить световое табло: "Не входить. Идет облучение ультрафиолетом" или вывесить табличку с надписью, предупреждающей о протекании процесса УФ-облучения в данном помещении.

Для достижения наиболее эффективного обеззараживания воздуха и поверхностей в помещении облучатель должен размещаться в помещении так, чтобы на пути распространения УФ-излучения было как можно меньше препятствий.

Облучение следует производить согласно внутреннему регламенту. В случае отсутствия внутреннего регламента необходимо выбрать в зависимости от типа помещения уровень бактерицидной эффективности:

- помещения категории I — операционные, предоперационные, родильные, помещения централизованных стерилизационных отделений, детские палаты роддомов, палаты для недоношенных и травмированных детей — 99,9 %;
- помещения категории II — перевязочные, комнаты стерилизации и пастеризации грудного молока, палаты и отделения для иммуноослабленных больных, палаты реанимационных отделений, бактериологические и вирусологические лаборатории, станции переливания крови, фармацевтические цеха — 99 %;
- помещения категории III — палаты, кабинеты и другие помещения медицинских учреждений, не относящиеся к категориям I и II, — 95 %;
- помещения категории IV — детские игровые комнаты, школьные классы, бытовые помещения промышленных и общественных зданий с большим скоплением людей при длительном пребывании — 90 %;
- помещения категории V — курительные комнаты, общественные туалеты, лестничные площадки — 85 %.

Минимальную длительность работы облучателя для достижения требуемой бактери-

цидной эффективности определяют как отношение объема воздуха в обеззараживаемом помещении к производительности облучателя:

$$t_{\text{мин}} = \frac{V_{\text{пом}}}{\text{Пр}},$$

где $V_{\text{пом}}$ — объем обеззараживаемого помещения;

Пр — производительность облучателя.

При расчете необходимо учитывать время выхода УФ-лампы на рабочий режим (2 мин).

Длительность сеанса обеззараживания для достижения требуемой бактерицидной эффективности и рекомендованное время работы облучателя определяют в зависимости от площади помещения и уровня бактерицидной эффективности (табл. 2).

Сразу после завершения сеанса облучения внутри помещения может ощущаться посторонний запах, возникающий при окислении органических веществ в воздухе и на поверхностях. Запах исчезает через несколько минут после выключения облучателя и естественного проветривания помещения.

Системы обеззараживания ультрафиолетом серии "МЕГАЛИТ" широко применяют в многоэтажных жилых зданиях и сооружениях, деловых и торговых центрах, лечебно-профилактических, образовательных, спортивных и общественно-культурных учреждениях, вокзалах, аэропортах и метро, промышленных предприятиях.

Системы УФ-обеззараживания обеспечивают высокую инактивацию по широкому спектру микроорганизмов, выполняют нормативные требования по санитарной чистоте и увеличивают срок хранения продукции. УФ-системы и установки компактны и просты в эксплуатации, не требуют специальных мер безопасности.

Таблица 2

Время работы облучателей "СВЕТОЛИТ" для достижения бактерицидной эффективности

Площадь помещения (при высоте потолков 3 м), м^2	Бактерицидная эффективность, %				
	85	90	95	99	99,9
"СВЕТОЛИТ-50Н"					
20	5	6	7	9	12
35	7	8	10	14	20
50	9	11	13	19	28
75	13	15	19	28	41
100	16	20	25	37	54
"СВЕТОЛИТ-100Н"					
20	5	5	5	6	8
35	5	6	7	9	13
50	6	7	9	12	17
75	8	10	12	17	24
100	10	12	15	22	31

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 11. С. 8—11.
2. **Амелькина С.А., Железникова О.Е.** Установки обеззараживания воздуха в системах вентиляции серии "МЕГАЛИТ" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 11—14.
3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 7. С. 25—28.
4. **Микаева С.А.** Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. М.: Научтехлитиздат, 2004. 210 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) 269-54-98, факс 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* *Корректор Сажина Л.И.*
Сдано в набор 13.01.2015. Подписано в печать 16.02.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.