

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

8 2014
(169)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Иванов А.А. Оптимизация управления технологическим процессом сборки методом динамического программирования 3

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка решетчатых и сотовых конструкций 6

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Герасимов Д.Г. Активный контроль при проведении сборочных операций 19

Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Сравнительный анализ достижимой точности способов обеспечения и контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпindelными гайковертами 24

Соединение деталей машин

Заярный С.Л., Ильашенко А.А. Исследование гидропрессового способа сборки-разборки конических соединений с увеличенными натягами. 28

Технологичность конструкции

Розин А.А., Вакулов П.С. Размерный анализ собираемости и монтажа конструктивно и технологически усовершенствованных сдвигоповоротных сильфонных компенсаторов. 35

Разное

Иванов А.А. Выработка управляющих решений в условиях неполной информации 40

Шишкарев М.П., Угленко А.Ю. Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием 44

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

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

Региональные редсоветы

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

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

THE MONTHLY
NEWSMAGAZINE
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

8 2014
(169)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Ivanov A.A. The optimization of the technological process assembly control by method of dynamic programming 3

Assembly welding works. Soldering

Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Soldering lattice and cell structures 6

Quality assurance. Testing. Monitoring

Gerasimov D.G. The active control during assembly operations 19

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu. The comparative analysis of achievable accuracy of ways of maintenance and control of axial forces of an inhaling of carving connections одношпindelными screwing up devices 24

Connections of details mashines

Zaiarnyi S.L., Ilyashenko A.A. Research of a hydropress way assembliesdismantlings of conic connections with the increased tightnesses 28

Manufacturability of a construction

Rozinov V.A., Vakulov P.S. Dimensional analysis of collectability and installation structurally and technologically advanced shifted-rotating bellows expansion joints. 35

Different

Ivanov A.A. The generation of management decisions under incomplete information 40

Shishkarev M.P., Uglenko A.Yu. Analysis of operational characteristics of adaptive variation of friction clutches with split power circuit 44

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
G.A. KULAKOV
V.A. NIKOLAEV

ST.-PETERSBURG

V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOLIATI

A.I. RYZHKOV

TULA

V.V. PREYS

KHABAROVSK

V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV

A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DNETSK

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 ПИ № 77-1747,
February 25, 2000 Free price

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency – 79748, the union catalogue "Pressa Rossii" – 84967, the catalogue "Pochta Rossii" – 60257) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building" 107076, Moscow, Stromynsky per. 4
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

УДК 658.527.011

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

Оптимизация управления технологическим процессом сборки методом динамического программирования

Дано описание динамического программирования – метода поэтапной оптимизации управления процессом, когда на каждом шаге принимается решение, от которого зависит успех на данном шаге, но с учетом последующих шагов. Показано, что основу динамического программирования составляет принцип оптимизации Р. Беллмана: "...каково бы ни было состояние оптимизируемой системы в результате какого-то числа шагов, управление на ближайшем шаге должно быть выбрано так, чтобы оно обеспечивало максимальный выигрыш на всех оставшихся шагах, включая данный". Это значит, что поиск оптимума не зависит от предыдущего состояния системы и определяется лишь ее состоянием в рассматриваемый момент времени.

It is shown, what the dynamic programming is a method of phased optimization of process control when on every step the decision from which the success of this step depends on is taken. The dynamic programming is based on the optimization principle of R. Bellman: "...regardless of the state system resulting from of any number of steps, at the next step the control should be selected to provide the maximum benefit on all of the remaining steps including this". That means that the search for the optimum does not depend on the previous state of the system and is only determined by its state at the considered moment of time.

Ключевые слова: динамическое программирование, оптимизация управления, состояние системы.

Keywords: dynamic programming, control optimization, state of the system.

Динамическое программирование (ДП) – метод поэтапной оптимизации управления процессом, когда на каждом шаге принимается решение, от которого зависит успех на данном шаге, но с учетом последующих шагов. Основу метода ДП составляет принцип оптимизации Р. Беллмана: "...каково бы

ни было состояние оптимизируемой системы в результате какого-то числа шагов, управление на ближайшем шаге должно быть выбрано так, чтобы оно обеспечивало максимальный выигрыш на всех оставшихся шагах, включая данный" [1]. Это значит, что поиск оптимума не зависит от предыдущего состояния системы и определяется лишь ее состоянием в рассматриваемый момент времени.

Оптимизация управления n -шагового процесса состоит в определении последовательности управлений U_0, U_1, \dots, U_{n-1} , при которых функционал достигает минимума

$$J_n(U) = \min \int_0^T Q[x(t), U(t)] dt,$$

где $Q[x(t), U(t)]$ – мгновенные потери (затраты) в момент t при состоянии системы $x(t)$ и управлении $U(t)$.

Рекуррентное соотношение $(n-l)$ -шагового процесса, начиная с шага l имеет вид (уравнение Беллмана):

$$f_{n-l}(x_l) = \min [Q(x_l, U_l) + f_{n-(l+1)}(x_{l+1})],$$

где $Q(x_l, U_l)$ – мгновенные потери на шаге l ; $f_{n-(l+1)}(x_{l+1})$ – суммарные потери на всех последующих шагах (рис. 1).

Оптимальное управление на каждом шаге определяется последовательным прохождением траектории управления от конечной точки x_k до начальной x_n . На любом шаге выбор делается из l вариан-

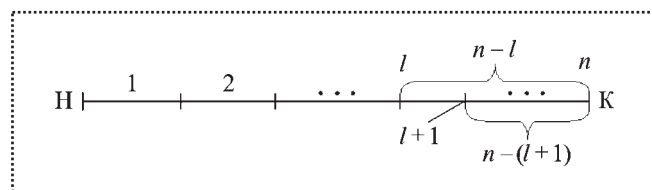


Рис. 1. Пояснение к уравнению Беллмана:
 n – число шагов

тов вместо l^{n-1} , где n – число шагов. Только последний шаг планируется без учета на будущее (рис. 2).

Метод ДП снимает проблему абсолютного и относительного экстремума, так как позволяет сразу находить абсолютный экстремум (в данном случае – минимум).

Процесс определения оптимальной траектории управления изображают на плоскости. Для этого проводят дискретизацию переменных, т.е. диапазон изменения параметра разбивают на интервалы. Дискретные состояния представляют узлами сети потерь (или затрат). Затраты $Q(x, U)$ на переход из данного узла к следующему обозначают числами на ребрах сети.

Для записи цифр минимальных потерь в узлах сети составляют специальные таблицы значений: x_{ij} , $Q_k(x, U)$ и $\min Q_k(x, U)$ на каждом шаге (где $\min Q_k(x, U) = f_k(x)$; k – номер шага). Например, управление на последнем шаге ($k=1$) имеет вид, представленный в табл. 1.

В табл. 1 использованы обозначения: x_{10} – координата на первом шаге управления параметром по горизонтали (код управления $U=0$);

x_{01} – координата на первом шаге управления параметром по вертикали (код управления $U=1$);

a и b – соответственно числа над ребрами сети потерь по горизонтали и вертикали. Числам a и b соответствует код $U_{\text{опт}}$.

В качестве примера рассмотрим задачу на определение оптимальной траектории управления с целью перехода на новый технологический процесс

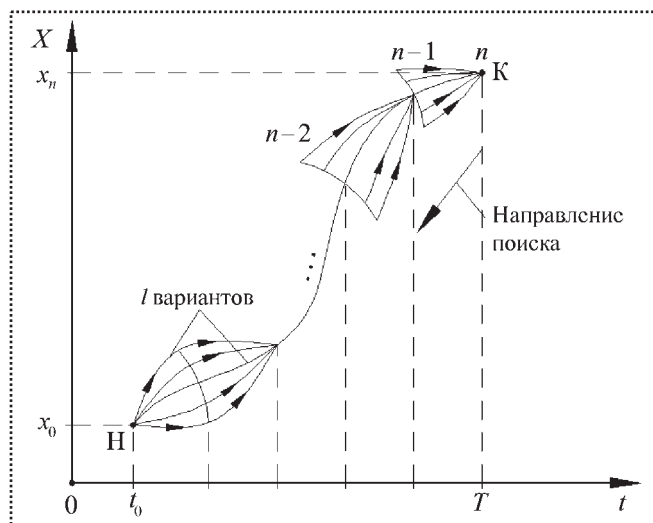


Рис. 2. Поиск оптимальной траектории управления методом ДП

Таблица 1

Управление на последнем шаге

x_{ij}	U_{ij}	$Q_1(x, U)$	$\min Q_1(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{10}	0	a	a	0
	1	–		
x_{01}	0	–	b	1
	1	b		

сборки. Пусть параметрами существующего технологического процесса являются: K_0 – качество продукции (например, точность); Π_0 – производительность. Требуется перейти на новый технологический процесс с параметрами: $K_1 > K_0$ и $\Pi_1 > \Pi_0$ при условии минимизации затрат.

Разобьем диапазоны изменения параметров K и Π на четыре интервала от 0 до 4, начиная с конечного значения x_k . Затраты $Q(x, U)$ на переход из данного узла до следующего обозначены на ребрах сети затрат K – Π (рис. 3).

Вначале проставим нарастающую сумму затрат в узлах нулевой вертикали (управление процессом по координате Π) и нулевой горизонтали (управление процессом по координате K). В обоих случаях других вариантов управления нет. Сумма затрат в узлах нулевой вертикали составит: 8, 14, 17, 18 единиц, а в узлах нулевой горизонтали – 9, 18, 24, 32 единицы (рис. 4).

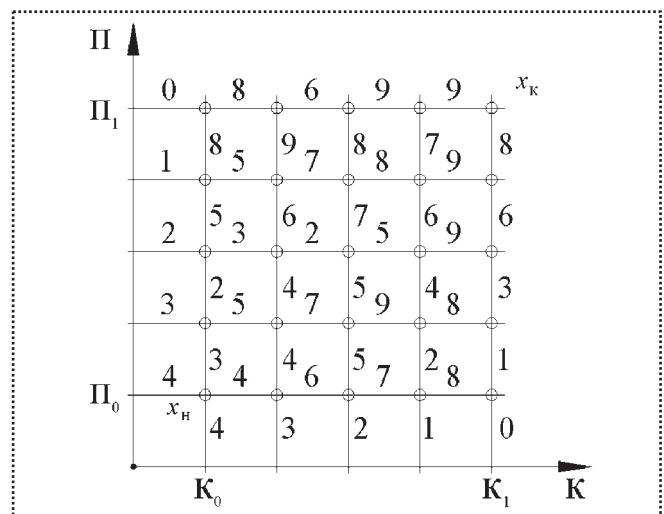


Рис. 3. Сеть затрат к примеру применения метода ДП

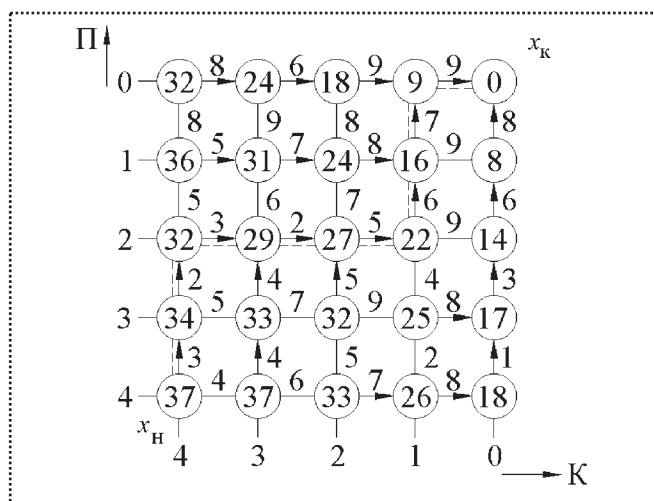


Рис. 4. Сеть затрат с оптимальной траекторией управления

Таблица 2

Управление для шага $k = 1$

x_{ij}	U_{ij}	$Q_1(x, U)$	$\min Q_1(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{10}	0 1	9 —	9	0
x_{01}	0 1	— 8	8	1

Затем находим суммарные затраты в узлах первой вертикали. В 1-м узле остается цифра 9. Во 2-м узле минимальная сумма составит $16 = 9 + 7$, так как в другом случае сумма больше и равна $17 = 9 + 8$. То же в 3-м узле: минимальная сумма $22 = 16 + 6$ (большая сумма $23 = 14 + 9$) и т.д. Аналогично поступаем с вертикалью 2 и другими вертикалями. Пути, по

Таблица 3

Управление для шага $k = 2$

x_{ij}	U_{ij}	$Q_2(x, U)$	$\min Q_2(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{20}	0 1	18 —	18	0
x_{11}	0 1	17 16	16	1
x_{02}	0 1	— 14	14	1

Таблица 4

Управление для шага $k = 3$

x_{ij}	U_{ij}	$Q_3(x, U)$	$\min Q_3(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{30}	0 1	24 —	24	0
x_{21}	0 1	24 26	24	0
x_{12}	0 1	23 22	22	1
x_{03}	0 1	— 17	17	1

которым получены минимальные суммы, отмечают стрелками.

Закончив заполнение узлов четырех вертикалей, по стрелкам проходим по сети затрат в прямом направлении от x_H до x_K и вычисляем суммарные затраты на оптимальной траектории управления.

Для нашего примера $\min Q(x, U) = 37$ единиц, а код оптимальной траектории управления $U_{\text{опт}} (11000110)$, где $U_k = 0$ — управление по параметру K , а $U_n = 1$ — управление по параметру Π . Приведем в качестве примера табл. 2–4 управления с минимальными затратами для нескольких шагов k .

Кроме метода ДП, достаточно эффективным является метод оптимизации, известный как "принцип максимума" академика Л.С. Понтрягина [1, 2].

Вывод

Оптимизация управления n -шагового процесса сборки состоит в определении последовательности управлений, при которых функционал достигает минимума. Оптимальное управление на каждом шаге определяется последовательным прохождением траектории управления от конечной точки до начальной. На любом шаге выбор делают из малого числа вариантов и только последний шаг планируют без учета на будущее. Метод ДП снимает проблему абсолютного и относительного экстремумов, так как позволяет сразу находить абсолютный экстремум (в данном случае — минимум).

Библиографический список

- Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Мир, 1978. 267 с.
- Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М.: Форум, 2011. 224 с.

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 621.791.048

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

Пайка решетчатых и сотовых конструкций

Рассмотрены особенности и достоинства решетчатых и сотовых конструкций, приведены паяльные материалы и технологии пайки конструкций.

Peculiarities and advantages of the grid and honeycomb structures contained soldering materials and technologies for soldering structures.

Ключевые слова: конструкция, пайка, припой, сборка, подготовка, нагрев, приспособление, фосфатное связующее.

Keywords: construction, brazing, soldering, assembling, preparation, heating, fixture, phosphate binder.

В современном строительстве и в промышленности широко применяют крупногабаритные пространственные решетчатые и сотовые металлоконструкции, обладающие минимальной массой и высокой технологичностью в изготовлении. Такие пространственные конструкции реализуют одну из актуальных задач современной техники и сооружений – минимальное использование металла при максимальной прочности конструкций. Эти конструкции обладают высокой устойчивостью к внешним эксплуатационным нагрузкам [1, 2].

Решетчатые конструкции являются наиболее прогрессивными элементами изделий. Важное значение в решетчатых конструкциях имеет система их регулярного строения, т.е. структурная система, которая обеспечивает простоту поточного производства (изготовления), хорошую транспортабельность и быстроту монтажа крупных конструкций.

Пространственную структурную схему можно представить состоящей из набора повторяющихся однотипных пространственных ячеек (многогранников) полной заводской готовности, собираемых из однотипных линейных, плоских или пространственных модулей.

Модульность строения позволяет организовать поточное производство однотипных элементов с низкой трудоемкостью изготовления, несмотря на

большое число элементов и компактность укладки узлов и модулей при транспортировке и хранении.

Решетчатые конструкции представляют собой несущую пространственную систему, состоящую из большого числа профилированных или плоских элементов, соединенных между собой болтами, сваркой и пайкой.

При малой толщине составляющих элементов решетчатые конструкции обладают высокой жесткостью и прочностью.

Решетчатые конструкции характеризуются малой металлоемкостью, т.е. малым отношением объема металла в конструкции к объему изделия в габаритных размерах, что определяется коэффициентом металлоемкости (составляющим в среднем 60 %). Широкие возможности решетчатых конструкций демонстрируют известные сооружения: Эйфелева башня в Париже, телебашня Шухова в Москве, сварной мост им. Е.О. Патона через Днепр в Киеве.

Одним из представителей решетчатых конструкций являются решетчатые опоры линий электропередач (ЛЭП). Обычно металлические опоры изготавливают из стали Ст3 с болтовым или сварным соединением элементов.

С целью повышения эффективности производства решетчатых опор ЛЭП и снижения стоимости их изготовления и транспортировки к месту установки в ПКБ Минэнерго СССР были проведены конструктивные изменения опоры и разработана технология индукционной пайки опор с использованием относительно дешевого и прочного припоя на железной основе марки П87, рассчитанного на пайку стальных конструкций с широкими сборочными зазорами (до 1 мм) [3, 4].

Применение сварных опор ЛЭП нерентабельно, так как при этом велики транспортные расходы. Паяную решетчатую опору выполняют из трех плоских независимых панелей, которые удобно транспортировать, обеспечивая высокий коэффициент загрузки транспортных средств.

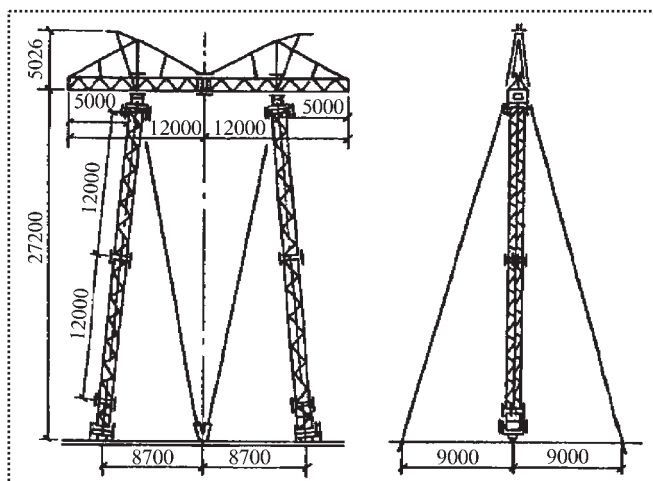


Рис. 1. Конструкция паяной опоры ЛЭП-500

Паяные соединения в отличие от сварных имеют сплошное прилегание раскосов к поясам и при цинковании конструкции обеспечивается получение монолитной конструкции опоры. Пояса стоек и траверсы состоят из двух ветвей, изготавливаемых из тонкостенного профиля сечением $40 \times 90 \times 554$ мм, соединенных пайкой через прокладки толщиной 8 мм. Решетка стоек и боковые решетки траверсы выполнены из гнутого швеллера сечением $32 \times 25 \times 3$ мм, а решетка нижней траверсы – из гнутого уголка сечением $50 \times 50 \times 3$ мм. Раскосы к поясам крепятся пайкой. Материал конструкции опоры СтЗсп. Паяную опору оцинковывают в цинковой ванне.

Конструкция плоских панелей позволяет не только механизировать процесс производства, но также облегчает и удешевляет транспортировку и монтаж опор. Устраняется недостаток сварных опор, связанный с низкой коррозионной стойкостью. На рис. 1 представлена конструкция промежуточной паяной опоры на оттяжках. Особенностью конструкции опоры является применение холоднотянутых профилей (пояса и раскосы). Масса опоры 6 т, а длина – 7 м.

Технологический процесс пайки решетчатых опор ЛЭП включает подготовку элементов конструкции к пайке, их сборку, нанесение припоя, закрепление элементов конструкции, пайку, нанесение защитных покрытий.

*ВЗМИ – Всесоюзный заочный машиностроительный институт (с 2005 г. – Московский государственный университет приборостроения и информатики – МГУПИ). *Прим. ред.*

Припой П87, представляющий собой твердый раствор на основе железа (40 %), разработанный для пайки стальных изделий в институте ВЗМИ* под руководством И.Е. Петрунина, не требователен к состоянию поверхности деталей и к величине сборочного зазора. Ржавчина, оставшаяся в местах пайки, может растворяться в припое при пайке и не оказывает существенного влияния на прочностные и другие характеристики паяных соединений.

Ввиду высокой температуры плавления припоя ($1150 \dots 1180$ °С) оставшаяся на поверхности влага испаряется, а масляные пленки выгорают. При пайке необходимо обеспечить защиту припоя от внешней среды, что достаточно легко осуществляется путем применения флюса, защитно-технологических покрытий или проточных защитных газовых сред.

Конструкции под пайку собирают на специальных стендах. Максимальная прочность соединений достигается при паяльных зазорах $0,4 \dots 0,5$ мм. При зазорах $1,1 \dots 1,2$ мм прочность снижается до 10 %. Оптимальным зазором при пайке опор из стали СтЗ припоем П87 считается зазор $0,4 \dots 0,8$ мм.

Припой в стык можно вносить в виде ленты толщиной $0,3 \dots 0,5$ мм, пасты или порошка, а также в виде закладных элементов на полимерном связующем.

Для соединения пайкой толстостенных элементов конструкции, когда затруднительно устанавливать равномерные сборочные зазоры, следует применять пасты припоя с содержанием порошка припоя 79...85 % мас. Составы паст приведены в справочнике [3].

Пайку проводят с использованием мобильного и скоростного способа индукционного нагрева, обеспечивающего эффективную локализацию процесса нагрева в области формирования соединения с высокой концентрацией в ней передаваемой энергии. По месту пайки устанавливают выносные трансформаторы с разъемными индукторами и смонтированными гидроцилиндрами для создания давления на паяемый участок. Трансформаторы могут быть установлены стационарно, а изделие, уложенное в кондуктор тележки, последовательно, с определенным шагом проходит через индуктор.

Режим индукционной пайки панелей опор ЛЭП (при пайке раскоса к поясу: площадь спая 900 мм^2): температура пайки 1180 °С, удельное давление на стык $10 \dots 20$ МПа, время выдержки $60 \dots 140$ с, ско-



рость нагрева 70...80 °С/мин, охлаждение – естественное.

Обработка паяных конструкций включает травление в растворе серной кислоты, промывку в проточной холодной и теплой воде (30...40 °С), флюсование с последующей сушкой и горячее цинкование в ванне.

Цинкование панели длиной 7 м производят в два приема – поочередно погружая один, затем другой конец панели в ванну с расплавленным цинком, имеющим температуру 450...460 °С, на 4...8 с. По окончании процесса цинкования панель вынимают и выдерживают в течение 10...20 мин над ванной для стекания избытков цинка и затвердевания цинкового покрытия. Для ускорения процесса остывания возможно применение принудительного охлаждения.

Элементы при пайке соединяют по плоскости контакта, поэтому "карманы" в паяном шве не образуются, что исключает попадание коррозионно-активных растворов в зазоры. В результате обеспечивается высокая коррозионная стойкость паяных конструкций.

Исследования показали, что непропаи до 60 % площади соединения, не выходящие в галтельные участки, практически не снижают статической прочности конструкции. Паяные опоры полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым сварным опорам ЛЭП, при их меньшей массе.

Экономическая и техническая целесообразность перехода от сварки на пайку в производстве решетчатых металлоконструкций опор ЛЭП складывается из повышения производительности труда при применении механизированных способов заготовки, сборки и пайки опор, снижения стоимости перевозок, сокращения эксплуатационных расходов за счет снижения металлоемкости паяной опоры.

Партия цельнопаяных решетчатых опор ЛЭП и цельнопаяных траверс опор ЛЭП-500 установлена на действующей линии электропередачи Владимир–Суздаль. Разработка новой промышленной технологии пайки решетчатых опор ЛЭП стала возможной благодаря созданию впервые в мире учеными института ВЗМИ под руководством И.Е. Петрунина высокоактивного припоя П87, обеспечивающего качественную пайку стальных изделий со сборочными зазорами, допускаемыми при сварке (до 1 мм). Успешное освоение принци-

пиально новой технологии пайки решетчатых опор ЛЭП и внедрение паяных решетчатых опор открывает широкие возможности по совершенствованию технологии производства крупных пространственных конструкций и по повышению их качества.

Благодаря доступности участков пайки при сборке решетчатых конструкций возможно применение и других методов их нагрева – электросопротивлением или газопламенного. В условиях массового производства наиболее целесообразна групповая пайка плоских панелей методом сопротивления на контактных машинах типа сварочных со специальными электродами, обеспечивающими рассредоточенный нагрев.

При индукционном или газопламенном нагреве необходимы специальные приспособления для поджата паяемых элементов и надежная защита внешних участков формируемого паяного шва от воздействия окружающей среды (защитные покрытия).

При поиске новых технических решений в процессе совершенствования технологии пайки пространственных металлоконструкций широкие перспективы имеет способ формирования паяных соединений методом заливки расплавом припоя сборочного зазора между нагретыми соединяемыми элементами [5]. При этом, в частности, используют припой на медно-марганцевой основе марки П65, созданный в ПКБ Минэнерго СССР под руководством И.Е. Петрунина [3]. Припой обладает рядом уникальных свойств, подтвержденных при его применении в промышленности. Его хладостойкие свойства способствуют широкому применению при производстве криогенной техники.

Припой П65 имеет достаточно высокую прочность (360 МПа), сопоставимую с прочностью низкоуглеродистых сталей и высокую пластичность, значительно превышающую пластичность припоев аналогичного назначения.

Характерно, что высокие значения ударной вязкости припоя практически не изменяются со снижением температуры до –196 °С. Шов, паяный припоем П65, представляет собой однофазную структуру раствора на основе меди.

Припой П65 на медно-марганцевой основе [3] имеет сравнительно низкую температуру плавления – 870...910 °С. Соединения, паяные припоем П65, обладают большим запасом пластичности при низких температурах, поэтому припой находит ши-

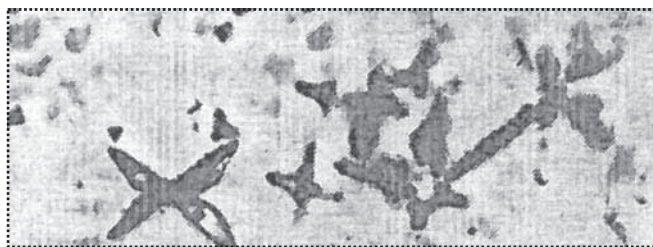


Рис. 2. Дендриты на основе железа в широком (2 мм) шве, паяном заливкой расплава припоя П65 ($\times 100$)

рокое применение при монтаже криогенной техники.

В процессе применения припоя была определена возможность получения высокопрочных и пластичных паяных стальных деталей при широких сборочных зазорах — 2...3 мм [5].

При заливке расплавом припоя широких зазоров в защитной среде обеспечивается высокая плотность паяного шва, полное отсутствие в нем газовых и шлаковых включений. При заливке происходит равномерная эрозия поверхности деталей и равномерное насыщение расплава припоя железом.

В процессе охлаждения и кристаллизации припоя в шве выделяются крупные разветвленные дендриты новой фазы на основе железа (рис. 2), что приводит к резкому повышению прочности паяного шва. Прочность на срез телескопических паяных соединений, полученных методом заливки, значительно превышает предел прочности исходного припоя.

При испытании кольцевого паяного образца на срез происходит значительная пластическая деформация паяного шва на сдвиг, который превышает 30° (рис. 3), что опровергает установившееся мнение о хрупкости паяных швов. Если по разработанной технологии индукционной пайки решетчатых опор соединяемые элементы располагают в горизонтальной плоскости, то при заливке их расположение должно быть вертикальным с надежной герметизацией сборочного зазора высокотемпературным стекловолокнистым материалом или защитно-технологическим покрытием, изолирующим офлюсованный участок пайки от внешней среды.

Заполнение широкого зазора припоем может осуществляться путем размещения припоя в зазоре, над зазором или из плавильного переносного литейного ковша. Разработана группа припоев на

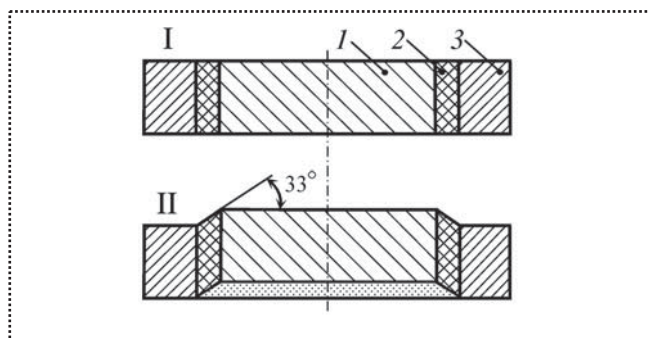


Рис. 3. Схема образца паяного телескопического соединения до (I) и после (II) испытания на срез:

1 — диск; 2 — паяный шов; 3 — кольцо

железной основе, применяемые совместно с флюсом ПВ201 [3].

Применение пайки при монтаже пространственных решетчатых металлоконструкций расширяет возможности по повышению их качества и эффективности выполнения монтажных работ.

Метод пайки заливкой расплавленного припоя в широкие паяльные зазоры между офлюсованными и подогретыми до температуры пайки деталями может стать новым прогрессивным направлением в паяльном производстве, расширяющим возможности по повышению прочности, пластичности и надежности паяных соединений. Результаты исследований и разработок в этом направлении обладают актуальной новизной и высокой эффективностью применения при производстве паяных промышленных металлоконструкций.

Решетчатые конструкции являются прогрессивными элементами современных технических изделий. Они состоят из обечайки и наполнителя, который представляет собой набор плоских элементов, соединенных с помощью параллельных прорезей в решетку (рис. 4). Плоские элементы наполнителя паяют по каждому перекрестью, а всю решетку по контуру припаивают к обечайке. К качеству паяных соединений наполнителя предъявляют высокие требования.

При разработке технологического процесса пайки конкретных решетчатых конструкций решают комплекс вопросов, в числе которых выбор припоя и способа нагрева, разработка необходимых приспособлений и технологических приемов [6].

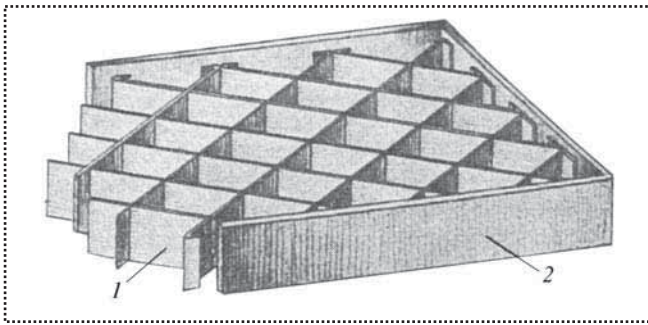


Рис. 4. Решетчатая конструкция:
1 – наполнитель; 2 – обечайка

Решетчатые конструкции изготавливают в основном из коррозионно-стойких сталей (1X18H10T и 00X12H3Д).

Раньше при их пайке использовали припой на серебряной основе. Однако высокая стоимость припоя и тенденция к повышению температуры эксплуатации конструкций привели к необходимости разработки новых припоев, отличающихся малой эрозионной активностью по отношению к паяемому металлу, хорошими технологическими свойствами и относительно невысокой температурой плавления.

Таким требованиям отвечают припои системы никель–марганец–медь. При пайке в вакууме этими припоями происходит испарение марганца, имеющего высокую упругость пара, что приводит к повышению температуры солидуса припоя. Благодаря этому уменьшается продолжительность взаимодействия жидкого припоя с паяемым металлом и повышается температура распая соединения. Временное сопротивление разрыву стыковых соединений из указанных марок сталей, паяных при температуре 1050 °С, достигает соответственно 600 и 1060 МПа.

Определено, что при пайке решетчатых конструкций наиболее рационально применять припой в виде порошка, который наносят на соединяемые поверхности насыпанием или с помощью вяжущих веществ. Предложено припой наносить на паяемые поверхности в виде суспензии – взвеси мелкодисперсного (менее 0,063 мм) порошка припоя в 5 %-ном растворе акриловой смолы в ацетоне. Суспензию необходимо вводить непосредственно в паяльный зазор, что позволяет существенно уменьшить расход припоя.

Суспензию изготавливают путем ручного или механического перемешивания смеси порошка

припоя и связующего. Длительность сохранения взвеси после перемешивания зависит от формы и размеров частиц припоя. Для получения стойкой суспензии более пригодны порошки с неправильной формой частиц, которые получают при распылении расплавленного в индукционной припоя газом под высоким давлением.

Нагрев заготовок решетчатых конструкций должен обеспечить такой термический режим, при котором отдельные элементы изделия не теряют устойчивости. Установлено, что при радиационном нагреве качество пайки более высокое, чем при других способах нагрева. Поэтому пайку конструкций проводят с радиационным нагревом в камере с низким остаточным давлением [(2,7...6,6)·10⁻³ Па] с двумя парами графитовых нагревателей, имеющими отдельную регулировку мощности. Этот способ позволяет регулировать скорость нагрева и охлаждения в зависимости от конкретного типа изделия.

Отдельные элементы решетчатых конструкций могут значительно отличаться по сечению, поэтому даже небольшие температурные градиенты приводят к потере устойчивости и короблению изделия.

Увеличение длительности нагрева для устранения перепада температуры в изделии экономически не выгодно. Наиболее рациональным способом является применение специальных фиксирующих приспособлений, в которых обечайку и наполнитель жестко закрепляют в приспособлении. Для изоляции конструкции от приспособления применяют слюду и вставки из поликорна [6].

Использование порошкового припоя для пайки наполнителя, с получением галтелей паяных швов минимальных размеров, требует точной дозировки припоя. В этом случае зазор под пайку определяется технологическими свойствами припоя и должен строго выдерживаться за счет обеспечения нужной ширины прорези в решетке.

Решетчатые конструкции нашли самое широкое применение в авиационной промышленности при производстве летательных аппаратов (самолетов). Они обеспечивают значительное снижение массы конструкции и повышение подъемной силы. Как известно, возможности, которыми обладают моноплановые крылья самолетов, становятся недостаточными для решения современных практических задач. Поэтому возникает необходимость увеличения у летательных аппаратов несущих поверхно-

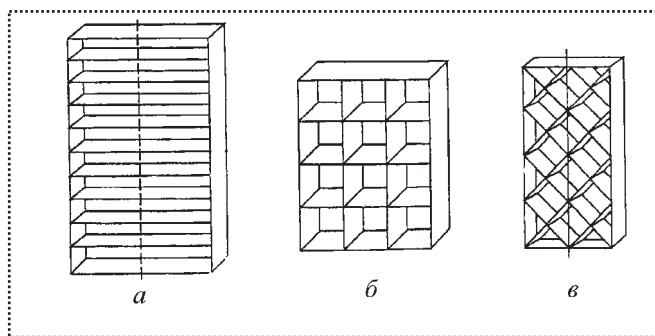


Рис. 5. Основные виды решетчатых конструкций:
а – рамная; б, в – сотовые

стей, что обеспечивается применением решетчатых крыльев.

Применяемые в авиации решетчатые крылья представляют собой аэродинамические полиплановые поверхности [7], имеющие значительные преимущества по сравнению с моноплановыми крыльями.

Решетчатое крыло представляет собой пространственную систему, состоящую из большого числа профилированных или плоских элементов (планов), соединенных между собой боковинами (рис. 5). Существуют два основных вида решетчатых крыльев [8]: рамные (с планами, перпендикулярными боковинам и параллельными между собой) и сотовые с диагональным или параллельным набором планов. Наибольшее распространение получило крыло с квадратными или шестигранными сотами, когда диагональный набор планов составляет с боковинами угол 45° (рис. 5, в).

Значимость решетчатых крыльев для авиации столь велика, что в начальный период применения их получали фрезерованием монолитных поковок, что связано с большими трудозатратами и потерями металла, до 90 % которого уходило в стружку.

Заготовки элементов решетчатого крыла изготавливают из листового материала штампованием, фрезерованием и шлифованием.

Сталь X18H10T хорошо паяется припоем марки Г70НХ на марганцевой основе. Он имеет температурный интервал плавления $1030...1090^\circ\text{C}$. Пайку стали ЭИ835 осуществляют припоями ПЖК-35 и ВПр1.

В последнее время специально для пайки решетчатых крыльев разработаны припои марки 6МА на никелевой основе: 13...16 % Cr, 17...23 % Mo, 6...8 % Si, 0,3...0,5 % В, Ni – осталь-

ное, с температурным интервалом плавления $1130...1160^\circ\text{C}$, и припой на железомарганцевой основе: 18...28 % Fe, 14 % Ni, 18...28 % Mn, 18...28 % Cr, 1 % Si, 1 % В, имеющий температурный интервал плавления $1200...1240^\circ\text{C}$.

Изготовление решетчатых конструкций можно проводить погружением в расплав припоя, с применением флюсовой пайки, с нагревом пламенем газовой горелки. В широком производстве процесс пайки проводят в печах в среде аргона в смеси с трехфтористым бором или в вакууме. Расход аргона составляет 15...25 л/мин.

В ИЭС им. Е.О. Патона для пайки конструкций из коррозионно-стойких сталей разработан припой системы никель–марганец (ПР-Н58Ф). Он хорошо растекается по поверхности коррозионно-стойких сталей (1X18H10T) при температуре 1100°C [9]. Пайка в вакууме этим припоем соединений с узкими зазорами (до 0,5 мм) обеспечивает высокие прочностные характеристики при нормальных и повышенных температурах, а также коррозионную стойкость и жаропрочность паяных соединений, удовлетворяющих условиям эксплуатации изделия.

После зачистки планы и стержни подают на предварительную сборку крыла. На собранном крыле выборочно проверяют зазоры в местах пересечения планов, значения которых должны составлять 0,05...0,20 мм. Это требование вытекает из условия заполнения их расплавом припоя, полоски которого прикрепляют к планам (рис. 6). Затем производят подготовку и прихватку внутреннего набора к окантовывающей раме с помощью контактной электросварки.

При подготовке к пайке проводят группу технологических операций по получению химически чистой поверхности соединяемых элементов (обезжиривание, травление, промывка, просушка), а затем наносят фольгу или полоски припоя, закрепляя их на элементах конструкции конденсаторной

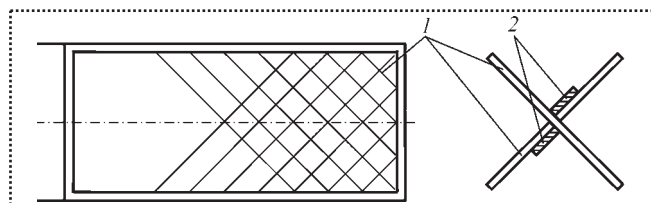


Рис. 6. Сборка под пайку:
1 – планы; 2 – пластинки припоя

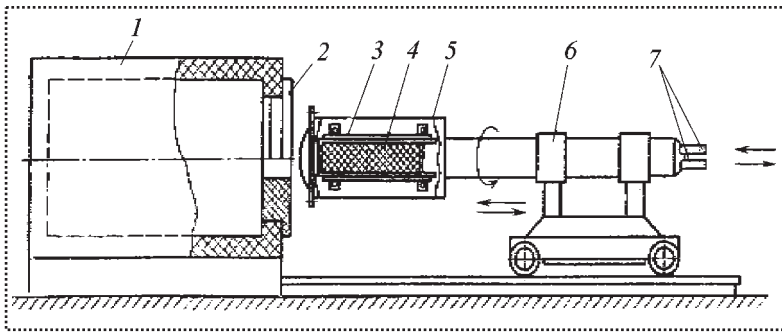


Рис. 7. Комплекс устройств для пайки решетчатых крыльев:

1 – высокотемпературная печь; 2 – разъемная дверца; 3 – фиксирующее приспособление; 4 – паяемое изделие; 5 – контейнер; 6 – тележка-манипулятор; 7 – трубопроводы для циркуляции газовой среды

электросваркой. Подготовленное крыло устанавливают в приспособление, вместе с которым его загружают в контейнер. После герметизации контейнера его рабочее пространство продувают защитным газом (аргоном) или в нем создают вакуум и контейнер подают в печь [10, 11].

Пайка является процессом окончательной сборки крыла, поэтому соблюдение назначенного режима пайки является главным условием получения высококачественного соединения.

Комплекс основных устройств, необходимых для высокотемпературной пайки, схематически показан на рис. 7.

При контроле готового изделия проверяют не только качество пайки, но и геометрические размеры и форму изделия. Проводят также испытания крыла на статическую прочность.

К заключительной операции относится нанесение на крыло защитного покрытия.

Стремление снизить массу конструкции привело к созданию полых решетчатых крыльев. Это позволило снизить массу аппарата на 30...45 % [7].

Особенностью технологии изготовления крыла полых конструкций является применение элементов из тонкой фольги толщиной 0,1 мм. Простейшими заготовками для планов и боковин служат тонкостенные листы, лента, фольга из стали 12X18H9T толщиной 0,08 мм и выше. При таких толщинах материала общая толщина трехслойной конструкции достигает 1,5 мм.

Перед пайкой между обшивкой и гофрированной проставкой размещают вырезанную из фольги заготовку припоя. Припой наносят на внутреннюю поверхность обшивки в виде плакирующего слоя или трехслойного гальванического покрытия

Ni–Cu (15 % Ni, Cu – остальное). Температура пайки составляет 1150 °С. При этой температуре в результате контактного плавления никеля и меди в зазоре образуется медно-никелевый сплав, выполняющий роль припоя.

Верхнюю и нижнюю обшивки крыльев изготавливают путем деформирования тонкостенной трубной заготовки или путем сварки по контуру тонкостенных заготовок с последующей растяжкой до заданного профиля.

Процесс пайки рекомендуют осуществлять в печах в вакууме или в среде аргона с трехфтористым бором.

Особенностью полых решетчатых планов является то, что наряду со снижением массы полые планы и боковины позволяют решать проблему охлаждения крыльев.

Решетчатые конструкции являются разновидностью широко распространенных изделий с сотовым наполнителем, в частности, трехслойной конструкции (рис. 8), которая состоит из несущих слоев – обшивок и наполнителя, размещенного между ними и элементами каркаса – окантовки. Трехслойные конструкции применяют в виде панелей, стенок, обечаек. Сотовые конструкции – панели – являются несущими конструкциями малой и средней плотности, имеющими, как правило, обечайки и наполнитель различной формы (рис. 9). Сотовый наполнитель является конструктивным элементом трехслойной конструкции с регулярно повторяющимися ячейками правильной геометрической формы. Существует большое разнообразие сотовых наполнителей с различными очертаниями ячеек. Наполнители в сотовых панелях выполняют роль

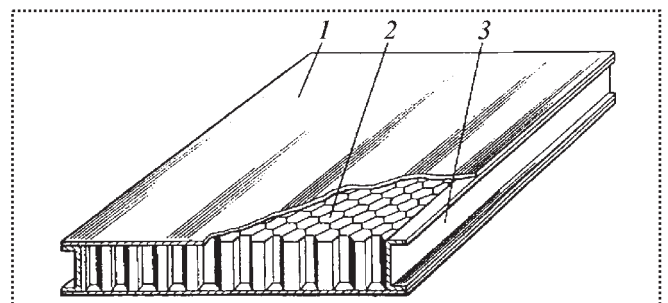


Рис. 8. Трехслойная конструкция:

1 – обшивка; 2 – сотовый наполнитель; 3 – окантовочная рамка

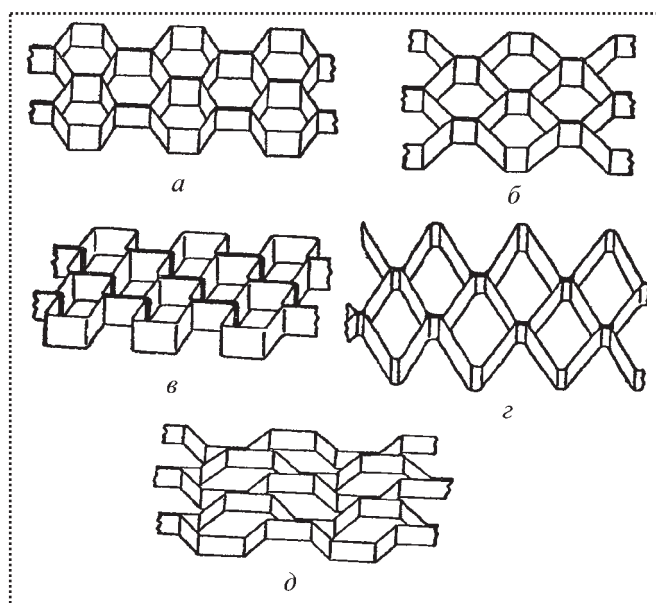


Рис. 9. Формы ячеек сотовых заполнителей: а – шестигранная; б – ромбическая; в – квадратная; з – синусоидальная; д – шестигранная смещенная

элементов, создающих непрерывную опору для обшивок.

В трехслойной конструкции несущие слои почти полностью воспринимают продольные нагрузки (на растяжение, на сжатие, на сдвиг) в своей плоскости и изгибающие моменты. Они определяют изгибную прочность и стойкость всей конструкции. Сотовый наполнитель обеспечивает большую жесткость на сдвиг и совместную работу несущих слоев, вследствие чего аэродинамические поверхности сохраняются даже при значительных нагрузках.

Конструкции с сотовым наполнителем применяют в самолетах (рис. 10) различного класса и назначения. Обшивка крыла самолета состоит из панелей с сотовым наполнителем, укрепленным каркасом.

Сотовый наполнитель изготавливают из стальной фольги толщиной 0,019...0,100 мм.

Сотовые конструкции являются разновидностью слоистых конструкций, представляющих собой сочетание обшивок и сотового наполнителя между ними. Наполнители (наполнители) в сотовых панелях выполняют роль элементов, создающих опору для обшивок.

Конструктивное сочетание сотового наполнителя с обшивками обеспечивает высокую жесткость узлов при нагрузках. Общая устойчивость сотовых

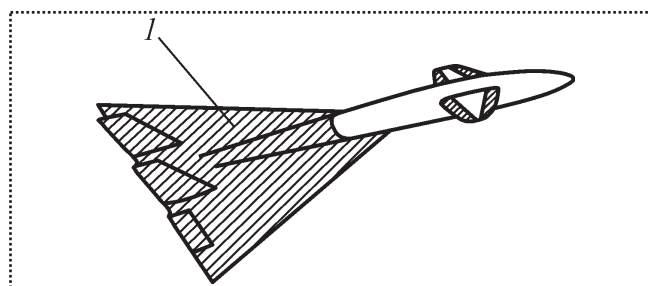


Рис. 10. Применение паяных панелей с сотовым наполнителем в конструкции самолета:

1 – паяные панели с сотовым наполнителем

конструкций во много раз превосходит устойчивость входящих в нее листов.

Панели с сотовым наполнителем позволяют применять несущие обшивки очень малой толщины (0,1 мм), что важно для уменьшения массы конструкции. Ячейки наполнителя в большинстве случаев имеют квадратную или шестигранную формы. Не ослабевает внимание специалистов к конструкциям с сотовым наполнителем, в самой идее которого заключена возможность постоянного улучшения характеристик удельной прочности и жесткости конструкций.

Трехслойная сотовая конструкция аналогична двутавровой балке, в которой сотовый наполнитель выполняет роль стенки, воспринимающей перерезывающие нагрузки, а несущие слои обшивок выполняют роль полок, воспринимающих растягивающие и сжимающие нагрузки.

Главная особенность трехслойной конструкции состоит в том, что благодаря разнесению несущих слоев достигается более высокое отношение жесткости конструкции к ее массе. При достаточно тонких несущих слоях (0,3 мм) панели могут выдерживать высокие критические напряжения.

Конструкции с сотовым наполнителем воспринимают все виды нагрузок – растяжение, сжатие, изгиб, кручение. Особенно высока их эффективность в использовании при двухосных и поперечных нагрузках.

Соединяют элементы сотовой конструкции пайкой, так как протяженные закрытые полости недоступны для сварочного инструмента.

При изготовлении сотовых конструкций применяют титановые сплавы и коррозионно-стойкие стали аустенитно-мартенситного класса СН-2, СН-3, СН-4, имеющие определенные преимущест-

ва перед другими сталями по механическим свойствам, коррозионной стойкости и паяемости.

В мировой практике для пайки титановых конструкций в основном используют припой систем Al–Cu–Si, Mn–Cr–Fe и др. Однако данные припои имеют ограничение по применению из-за содержания меди и никеля. Современные технологии пайки и припои должны обеспечивать получение паяных швов со свойствами, близкими к свойствам паяемого металла. Этим обусловлены температурно-временные пределы циклов пайки, определяемые природой титановых сплавов. Эти пределы ограничивают возможность появления нежелательных изменений структуры и свойств сплавов, обусловленных полиморфизмом титана.

Разработаны [12] припои на основе системы Ti–Zr–(Fe–Mn–Co) для пайки деформируемых и интерметаллидных титановых сплавов, обеспечивающих температурно-временные параметры технологического процесса вакуумной пайки, сохраняющие микроструктуру и механические свойства исходного паяемого материала, а также исключающие образование хрупких интерметаллидных фаз в металле паяных швов.

В институте ИЭС им. Е.О. Патона были разработаны такие припои на основе систем Ti–Zr–Fe, Ti–Zr–Mn, Ti–Zr–Co, которые охватывают температурный интервал пайки современных конструкционных титановых материалов как на основе твердых растворов, так и интерметаллидов. Припои обеспечивают получение паяных соединений, равнопрочных паяемому металлу, как при комнатной, так и при повышенных температурах и при испытаниях на длительную прочность.

Наиболее низкую температуру плавления (920 °С) имеет припой системы Ti–Zr–Co с содержанием кобальта 15...20 %, обеспечивающий прочность паяных соединений выше, чем при пайке стандартными припоями и при более низкой температуре пайки [12]. Шов, паяный этим припоем, представляет собой сросшиеся зерна паяемого металла (рис. 11). Лишь изучение химической неоднородности позволяет выявить участок шва. Его химический состав на границе практически идентичен паяемому металлу.

Наиболее эффективны и технологичны в применении при пайке титановых сплавов ленточные аморфные припои. Они обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с кристаллическими аналогами: пластичны, более гомогенны по

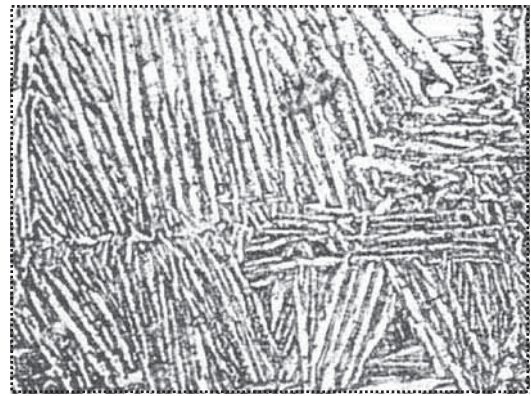


Рис. 11. Структура шва, паяного припоем системы Ti–Zr–Co

химическому составу и структурному состоянию, имеют стабильную толщину, однородно плавятся по всему объему, обладают высокой механической прочностью и коррозионной стойкостью, однако отличаются относительно высокой температурой плавления (950 °С). К таким припоям, применяемым при пайке титановых сплавов, относят припой СТЕМЕТ 1201 (на основе титана) и СТЕМЕТ 1406 (на основе циркония). Путем введения в эти базовые аморфные припои в качестве депрессанта бериллия в МИФИ-АМЕТО (г. Москва) были получены новые аморфные припои в виде ленты СТЕМЕТ 1202 (на основе титана) и СТЕМЕТ 1409 (на основе циркония), имеющие температуру плавления соответственно 857 и 767 °С.

Пайку данными припоями конструкций из титановых сплавов в вакуумной печи проводят при температурах ниже температуры α – β –превращения в чистом титане. Это позволяет повысить прочность паяных соединений и избежать деградации свойств паяемого металла.

Более низкая температура пайки с использованием этих припоев в сочетании с высокой диффузионной подвижностью при плавлении припоев позволяют уменьшить длительность термического цикла пайки.

Модифицированные аморфные припои выпускают в виде лент толщиной 0,04 мм и шириной 10 мм.

Для повышения прочностных характеристик припой СТЕМЕТ 1201 дополнительно легирован ванадием, а СТЕМЕТ 1406 – ниобием [13].

Припои, применяемые при пайке сотовых конструкций из коррозионно-стойких сталей, должны



иметь температуру пайки, совпадающую с температурой нормализации паяемой стали. Они не должны охрупчивать, растворять и разупрочнять паяемый металл. К таким припоям относятся: Л62, Г40, Г70, ВПр2, ВПр16. Также они должны обладать устойчивостью против коррозии и окисления [14].

Припои должны образовывать качественные галтели определенного размера, определяющие прочность паяных соединений и обладать самофлюсующими свойствами. Наиболее удовлетворяют этим требованиям припои, легированные медью и литием, не растворяющие паяемый металл.

Припои на основе меди более экономичны, но склонны к межкристаллитному проникновению в паяемый металл и имеют невысокую коррозионную стойкость. Для повышения их технологических свойств припои легируют марганцем, никелем и серебром (ВПр13).

Перед сборкой конструкции детали подготавливают к пайке. Детали из титана обезжиривают бензином с антистатической присадкой или ацетоном, затем травят в 30 %-ном растворе азотной кислоты с добавлением 30 %-ной фтористоводородной кислоты при 20 °С в течение 20 с. После травления детали промывают в проточной воде и сушат при температуре 80...100 °С.

Хорошие результаты получают при очистке титановых деталей перед обезжириванием наждачной шкуркой.

Детали из коррозионно-стойкой стали также обезжиривают в бензине или ацетоне и травят в том же растворе кислот в течение 30 с с последующей промывкой в горячей воде (70...80 °С) с последующей сушкой.

Подготовленные к пайке детали устанавливают в приспособлении для пайки с фиксацией их относительного положения. Важное значение имеет хорошее прилегание обшивок к сотовому заполнителю и к элементам каркаса и установка допустимых зазоров.

Зазор между обшивкой и сотовым заполнителем из коррозионно-стойких сталей следует устанавливать в пределах 0,10...0,15 мм. Зазор между обшивками и элементами каркаса не должен превышать 0,05 мм. Значения зазоров проверяют после создания оптимального давления на конструкцию с помощью шупов.

На места пайки укладывают заготовки, вырезанные из фольги припоя, и прихватывают их точечной электросваркой. Полоски фольги припоя шириной 80...120 мм могут быть свободно выложены по всей поверхности обшивки и закреплены на ней точечной электросваркой.

Припой можно также наносить на собираемые детали в виде лакированного слоя или многослойных покрытий автовакуумным напылением или гальваническим методом.

Одной из основных задач при разработке технологии пайки решетчатых и сотовых конструкций является поиск надежного способа нанесения порошковых припоев на участки пайки. Припой следует наносить равномерно, дозированно с тем, чтобы он обеспечивал качественное заполнение паяного зазора. В ИЭС им. Е.О. Патона разработан и применен простой и надежный способ нанесения порошкового припоя на изделие.

Для закрепления порошка на поверхности деталей было использовано свойство термопластов переходить при нагреве в пластическое состояние [15]. В качестве связующего была использована акриловая смола БМК-5. На ее основе подобрана связка, получившая марку С-89-1. Ее состав: растворитель Р5 – основа, бутилметакрилат БМК-5 – 8,9 %, диоктилсебацат – 0,60...0,62 %.

Разработанный способ нанесения порошкового припоя на места пайки сводится к следующему. На подготовленные к пайке детали краскораспылителем наносят слой связки толщиной 10...12 мкм. После высыхания связки производят сборку конструкции. Затем ее заполняют порошковым припоем и нагревают до температуры 100 °С. После выдержки для выравнивания температуры порошок высыпает, при этом частицы порошка припоя, находившиеся в контакте со связкой, остаются на ее поверхности. Этот способ особенно эффективен при пайке компактных и небольших решетчатых и сотовых конструкций с плотным расположением планов.

Собранную под пайку панель с приспособлением помещают в керамический контейнер, который заполняют аргоном. Для активации нейтральной атмосферы аргона в контейнере размещают навески тетрафторбората калия (KBF_4), образующего газообразный флюс, из расчета 0,1 г на 1 л объема контейнера [16].

Наиболее эффективен нагрев при пайке панели с использованием кварцевых термооблучателей,

обеспечивающих максимальную скорость нагрева в камерной электропечи.

Сотовую панель, помещенную в герметичный тонколистовой кожух, погружают в камеру нагрева. После включения печи нагреваются до температуры 940...960 °С за 2–3 мин. Это является большим преимуществом способа, особенно при пайке конструкций из титановых сплавов.

Наиболее простым и эффективным оборудованием для нагрева конструкций под пайку являются камерные электропечи сопротивления, которые обеспечивают равномерный нагрев изделий до температуры пайки с плавной регулировкой режима нагрева. Они просты и надежны в эксплуатации, обеспечивают при пайке поддержание необходимого давления защитного газа в камере, либо восстановительной среды.

После пайки и охлаждения контейнер вскрывают и паяную панель подвергают обработке холодом и старению. Паяная панель проходит визуальный осмотр с проведением замеров.

В производстве сотовых панелей применяют также специальные приспособления для пайки, обеспечивающие надежное поджатие конструкции в процессе пайки [10].

Поджатие может осуществляться одним из трех способов: механическим, вакуумным, пневматическим. На рис. 12 показано приспособление, в котором давление в процессе пайки создается за счет действия силы тяжести графитовой плиты 1. При этом между сотовой панелью 8 и грузом прокладывают лист 4 из коррозионно-стойкой стали, который в известной степени предохраняет материал панели 8 от взаимодействия с графитом и уменьшает на обшивках отпечатывание контура сот. Па-

нель с боков фиксируют вкладышами 7. Температуру нагрева контролируют с помощью термопар, закрепленных в некоторых участках панели.

После сборки приспособление закрывают крышкой 2 и герметично заваривают по периметру. Из полости приспособления вакуумным насосом удаляют воздух, а затем в нее подают аргон. Могут применяться также собираемые в заварном стальном конверте панели с помещенными между ними керамическими плитами с продольными каналами. В каналы устанавливают нагреватели, а при охлаждении паяного изделия в них пропускают воздух.

Наибольшее распространение в промышленности получили приспособления, в которых прижим осуществляется избыточным давлением воздуха, получаемом при вакуумировании. Применяемые приспособления представлены в источнике [10].

Более равномерное давление на панель создают приспособления с пневматическим приводом. Панель устанавливают на нижнюю опору приспособления. На панель укладывают плоский мешок, выполненный из коррозионно-стойкой стали и соединенный с сетью сжатого воздуха. Стык между опорами герметизируют с помощью уплотнительного затвора и скрепляют скобами. Пайку ведут в среде аргона.

Для сотовых конструкций из титановых сплавов с тонкостенными элементами (0,1...0,2 мм), позволяющих обеспечить необходимый прижим паяемых поверхностей, наиболее целесообразной может являться контактно-реактивная диффузионная пайка через медное покрытие, наносимое методом термовакуумного напыления. Для тонкостенных деталей (0,1 мм) этот способ нанесения покрытия является наиболее рациональным, так как не требует специальной подготовки поверхности и позволяет с высокой точностью получать требуемую толщину покрытия.

Контактно-реактивная диффузионная пайка обеспечивает получение соединений с прочностью, приближающейся к прочности паяемого металла. Такая технология прошла широкую промышленную проверку при пайке изделий толщиной свыше 0,8 мм и показала высокие надежность и качество изделий.

Однако технологический цикл пайки вызывает ухудшение механических свойств паяемого металла, что обусловлено ростом зерна и газонасыщением титана. При толщине деталей 0,1...0,2 мм это влияние значительно возрастает,

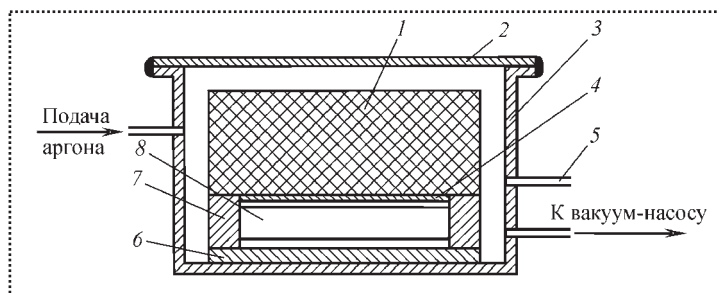


Рис. 12. Приспособление для пайки с созданием давления графитовой плитой:

1 – графитовая плита; 2 – крышка; 3 – корпус приспособления; 4 – технологический лист; 5 – место ввода термопар; 6 – плита; 7 – вкладыш; 8 – сотовая панель



так как размеры зерна, глубина газонасыщенного слоя и диффузионной зоны взаимодействия с припоем будут одного порядка с толщиной паяемых деталей.

Термический цикл нагрева определяется режимами контактно-реактивной диффузионной пайки: температура пайки 900...980 °С, время выдержки 60...120 мин.

При пайке в вакууме остаточное давление является недостаточным для защиты изделия от газонасыщения. Продолжительный нагрев изделия из титана и его сплавов может привести к их охрупчиванию и потере прочности. Снижения газонасыщения паяемого металла добиваются использованием защитных экранов. Пайка тонкостенных конструкций из титана и его сплавов с тщательным экранированием позволяет сохранить пластические свойства паяемого металла.

Определен оптимальный режим контактно-реактивной диффузионной пайки сотовых конструкций из тонкостенных (0,1 мм) деталей с медным покрытием толщиной 8 мкм с применением защитного экрана (контейнера) из титанового сплава ОТ4. Пайку проводят в вакууме ($1,33 \cdot 10^{-5}$ Па) при температуре 940 °С с выдержкой 60 мин с поджатием деталей [16].

При изготовлении сотовых конструкций с поджатием деталей можно применять капиллярную пайку пастообразным припоем ВПр16. Этот припой отличается малой степенью взаимодействия с титановыми сплавами, обеспечивает заполнение неравномерных зазоров (до 0,8 мм) в любом пространственном положении и формирование качественных галтелей.

Капиллярная пайка в вакууме припоем ВПр16 титановых сплавов при температуре 920...930 °С с выдержкой 15...20 мин обеспечивает получение соединений с прочностью на срез 250...350 МПа [16].

При пайке тонкостенных сотовых конструкций в результате эрозии паяемого металла в расплаве припоя может происходить образование сквозных подрезов и непропаев. Расплав припоя может вытекать из широких зазоров с образованием "карманов".

Это явление наблюдалось при пайке сотового заполнителя с медным основанием при использовании медно-фосфористого припоя взамен серебряного.

Определено, что эти проблемы качества пайки можно решать путем применения композитного припоя на фосфатном связующем [17]. Разработаны и применяются связующие вещества, образующиеся при взаимодействии фосфорной кислоты с оксидами металлов, твердеющие при комнатной температуре (18...20 °С) и образующие прочное сцепление с металлом.

Твердение фосфатных связующих веществ происходит в результате образования фосфорнокислых соединений, являющихся структурной основой получаемого цемента, термически стойкого при температурах пайки.

Быстротвердеющие цементы образуются при взаимодействии фосфорной кислоты со следующими оксидами металлов: Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , NiO , CuO .

При взаимодействии, например, с оксидом меди фосфорная кислота при температуре 18...20 °С образует быстротвердеющий цемент, приобретающий максимальную прочность в течение суток. При повышении концентрации оксида скорость взаимодействия компонентов возрастает. Вторым фактором, влияющим на скорость реакции, является температура при взаимодействии.

Так длительность затвердевания цемента системы $CuO-H_3PO_4$ при 20 °С составляет 30 мин. При 70 °С для затвердевания достаточно 1 мин, а при 100 °С затвердевание происходит практически мгновенно. Для повышения прочности сцепления с металлом в композицию добавляют порошок меди. В другие композиции добавляют металлический порошок или порошок припоя, температура плавления которого близка к температуре размягчения цемента.

Связующую композицию изготавливают путем составления равномерной смеси металлического наполнителя и оксида металла (10...20 %), которую затворяют фосфорной кислотой. Температура смеси при приготовлении связующего не должна превышать 35 °С. Смесь должна быть использована в течение 30 мин после приготовления.

Пасту припоя получают путем внесения в полученную композицию связующего 80...90 % порошкового припоя.

После нанесения пасты на паяемые поверхности их выдерживают в течение 3 ч для затвердевания пасты.



До нагрева структура нанесенной композиции состоит из отдельных изолированных друг от друга сферических частиц припоя в цементе. После нагрева расплавленные частицы припоя сливаются друг с другом и с поверхностью паяемого металла, образуя в цементной массе металлический каркас.

Локализация и блокирование расплавленных частиц припоя цементной матрицей паяемого металла предотвращает эрозию и вытекание расплавленного припоя из широких зазоров.

Процесс пайки пастой на цементной связке более, чем на порядок дешевле процесса при пайке серебряным припоем (ПСr45) и позволяет в статическом положении изготавливать изделия сложной формы, что невозможно при использовании традиционных припоев.

Фосфатные быстротвердеющие связующие с тугоплавкими добавками или без них могут успешно применяться при пайке крупных решетчатых конструкций (опор ЛЭП) для герметизации широких сборочных зазоров.

Библиографический список

1. Клячин А.З. Металлические решетчатые пространственные конструкции. Свердловск: Стройиздат, 1984. 93 с.
2. Клячин А.З. Структурные конструкции. Свердловск: Стройиздат, 1982. 83 с.
3. Пайка металлов: справочник / Под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.

4. Пайка при производстве крупногабаритных строительных металлоконструкций / И.Е. Петрунин и др. М.: Стройиздат, 1980. 115 с.

5. Пайка с принудительным формированием шва при некапиллярных зазорах / И.Е. Петрунин и др. // Сварочное производство. 1983. № 8. С. 23–26.

6. Технология низкотемпературной вакуумной пайки узлов решетчатых ферменных конструкций / В.Ф. Хорунов и др. // Автоматическая сварка. 1992. № 2. С. 22–53.

7. Белоцерковский С.М. Решетчатые крылья. М.: Машиностроение, 1985. 320 с.

8. Корниенко Л.В., Жадкевич А.М. Разработка и применение паяных решетчатых и сотовых конструкций в авиационной технике // Автоматическая сварка. 2006. № 12. С. 18–25.

9. Пайка решетчатых конструкций в вакууме / В.Ф. Хорунов и др. // Автоматическая сварка. 1984. № 1. С. 61–63.

10. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым наполнителем. М.: Машиностроение, 1982. 151 с.

11. Берсудский В.Е. Производство сотовых конструкций. М.: Машиностроение, 1986. 282 с.

12. Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Воронов В.В. Припой системы Ti–Zr–(Fe–Mn–Co) для пайки титановых сплавов // Автоматическая сварка. 2013. № 7. С. 46–51.

13. Калинин Б.А. Новые аморфные припои для пайки титана и его сплавов // Сварочное производство. 2001. № 3. С. 37–30.

14. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций / В.Е. Берсудский и др. М.: Машиностроение, 1975. 295 с.

15. Музалевский Н.Г. Исследование и разработка технологического процесса пайки тонкостенных пластинчатых теплообменников летательных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1982.

16. Особенности пайки тонкостенных конструкций из титана / Б.Н. Перевезенцев и др. // Сварочное производство. 1975. № 3. С. 38–39.

17. Шибалов М.В., Куфайкин А.Я. Пайка медных сотовых конструкций на фосфатном связующем // Сварочное производство. 2003. № 9. С. 50–52.



ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

ООО "Издательство Машиностроение"
продолжает подписку на журнал
**"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ,
ПРИБОРОСТРОЕНИИ"**

- За наличный и безналичный расчет.
- С любого номера и на любой срок.
- Без почтовых наценок.

**Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:**

107076, г. Москва, Стромьинский пер., д. 4,

Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98, факс: (499) 269-48-97

e-mail: realiz@mashin.ru, www. mashin.ru

Активный контроль при проведении сборочных операций

Рассмотрена задача контроля положения и правильности установки собираемых компонентов непосредственно во время проведения сборочных операций. Описан способ контроля положения компонентов во время сборки. Приведена методика расчета требуемой точности исполнительного оборудования. Способ пояснен на примере сборки термовыделяющего элемента ядерного реактора.

The problem of monitoring the proper installation of components during assembly of products was considered. We describe a method for monitoring the position of the components during assembly. Carry out the methodology for calculating the required precision equipment for assembly. The method is illustrated on an example of assembly operations on the fuel rod of a nuclear reactor.

Ключевые слова: сборочное производство, технология сборочного производства, активный контроль.

Keywords: assembly plant, assembling production technology, active control, fuel rod production.

Введение

Под активным контролем при проведении сборочных операций следует понимать контроль положения и правильности установки собираемых компонентов непосредственно во время проведения сборочных операций. Если контроль положения всех устанавливаемых компонентов производится непосредственно на операциях сборки, то брак выявляется заблаговременно и лишние технологические переходы с изделием не производятся. Это особенно актуально при автоматизированной сборке изделий, когда между операциями сборки и послеоперационного контроля, на котором может быть выявлен брак сборочной операции, над изделием осуществляется ряд дорогостоящих технологических переходов. Кроме того, отбраковка изделия на ранней стадии облегчает его последующую разборку и переработку. Активный контроль также может быть полезен при сборке изделий, визуаль-

ный контроль качества сборки которых невозможен или сильно затруднен.

В общем случае каждое твердое тело имеет шесть степеней свободы, следовательно, для контроля правильности установки необходимо контролировать шесть координат. Возможны случаи, когда число степеней свободы собираемых компонентов меньше шести. Наиболее простой случай, когда при сборке достаточно контролировать одну координату. Например, это будет в случае, когда собираемые компоненты располагаются соосно вдоль одной оси, а вращение компонентов вокруг оси не учитывается. Именно такой случай реализуется при сборке тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) ядерного реактора стержневого типа. Процесс сборки ТВЭЛ в специальной литературе часто называют снаряжением ТВЭЛ.

Постановка задачи

Типовая конструкция современного ТВЭЛ стержневого типа, представленная в работе [1], дана на рис. 1. ТВЭЛ содержит стальную трубчатую оболочку 7, герметично закрытую на одном конце первой заглушкой 3, а на другом конце – второй заглушкой 1. Между этими заглушками в оболочке 7 расположены вставка 4, таблетки 5, пружинящий цилиндрический фиксатор 2 и вставка 6. Вставка 6 предназначена для удержания выделяющейся с таблеток пыли. Топливный столб длиной $L_{ст}$ набирают из таблеток.

Компоненты 1, 2, 6 вместе называют комплектующими изделиями. Сборка ТВЭЛ предполагает последовательную установку следующих компонентов в оболочку 7 с предварительной установкой вставки 3:

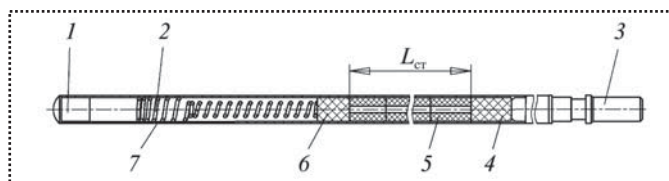


Рис. 1. ТВЭЛ стержневого типа

• таблеток 4, набранных фрагментами. Топливный столб внутри ТВЭЛ набирают из нескольких фрагментов, которые в сумме обеспечивают необходимую длину $L_{ст}$ топливного столба [2];

- вставки б;
- пружинящего цилиндрического фиксатора 2;
- верхней заглушки 1.

Пружинящий цилиндрический фиксатор 2 предназначен для фиксации топливного столба. Фиксатор вводят в оболочку штоком до упора в топливный столб, после чего фиксатор здесь же расклинивают, обеспечивая стабильность положения таблеток внутри оболочки (рис. 2).

Расстояние $L_{кп}$ между открытым торцом снаряжаемой оболочки и столбом топливных таблеток называют компенсационным объемом.

При сборке ТВЭЛ компоненты цилиндрической формы вводят внутрь оболочки трубчатой формы. Они имеют две степени свободы – перемещение вдоль оси трубчатой оболочки и вращение вокруг этой оси. Так как устанавливаемые компоненты являются осесимметричными, то их вращение вокруг оси не оказывает влияния на выходные параметры изделия и поэтому его не учитывают при сборке.

При сборке ТВЭЛ контролируют: длину столба топливных таблеток в оболочке, зазоры единичные и суммарные между топливными таблетками (сплошность топливного столба), наличие фиксатора и его поджатие. Могут контролировать и менее значимые параметры [3].

Спецификой сборки ТВЭЛ является то, что компоненты собирают внутри непрозрачной трубчатой оболочки и их положение не может быть проконтролировано визуально. На сегодняшний день большинство этих параметров контролируют только после сборки гамма-абсорбционным методом.

Следует отметить, что сплошность столба топлива в ТВЭЛ относится к параметрам, которые ре-

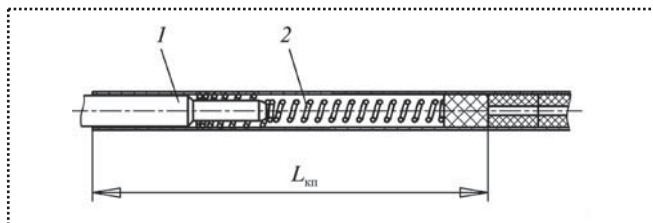


Рис. 2. Установка пружинного фиксатора:

1 – устанавливающая шток; 2 – пружинный фиксатор

шающим образом влияют на работоспособность ТВЭЛ, несоблюдение которого может привести к повреждениям, неприемлемым с точки зрения ядерной безопасности. Одной из причин образования зазоров между топливными таблетками может быть попадание топливной крошки в пространство между таблетками.

Необходимо разработать способ автоматизированной сборки ТВЭЛ, включающий установку столба топливных таблеток и комплектующих в открытый конец оболочки ТВЭЛ, при котором осуществляется активный контроль сплошности топливного столба, суммарной длины топливного столба внутри ТВЭЛ, значения зазора между всеми компонентами, поджатия пружинного фиксатора, а также правильности установки верхней заглушки.

Способы снаряжения ТВЭЛ с применением активного контроля

Предшествующий уровень техники. Отдельные элементы активного контроля при сборке ТВЭЛ применялись ранее. В частности, в способе формирования топливного столба внутри ТВЭЛ, описанном в работе [4]. По этому способу столб топливных таблеток формируют неполным и загружают набранный неполный столб в оболочку ТВЭЛ. Длину столба топливных таблеток в снаряженной оболочке измеряют после установки топливного столба внутрь ТВЭЛ методом замера длины компенсационного объема в снаряженной оболочке. *Компенсационный объем* – расстояние между открытым торцом снаряжаемой оболочки и столбом топливных таблеток $L_{кп}$. Соответственно по разнице между известной длиной части оболочки ТВЭЛ, предназначенной для размещения топливного столба и длиной компенсационного объема определяют длину столба топливных таблеток в оболочке.

Затем формируют недостающую часть топливного столба и доснаряжают недостающую часть топливных таблеток в оболочку. На основании замеренной длины компенсационного объема делают вывод о длине топливного столба и о размере недостающего фрагмента топливного столба.

В данном способе не учитывают то, что длина компенсационного объема может определяться не только суммарной длиной таблеток набранного столба. На длину компенсационного объема могут



также повлиять образовавшиеся при установке неполного топливного столба зазоры между отдельными таблетками, заклинивание топливного столба на пути к позиции размещения, разрушение таблеток в процессе установки и т.п. Причиной сбоя при установке также могут быть: повреждение (сужение внутреннего диаметра) или искривление оболочки ТВЭЛ, повреждение таблеток топливного столба при загрузке, попадание топливной крошки в пространство между таблетками. Брак, связанный с образованием в процессе установки зазоров между отдельными топливными таблетками, при таком способе может быть выявлен только впоследствии, например гамма-абсорбционным методом. В этом случае проведение операции доснаряжения становится абсолютно бесполезным, поскольку может проводиться на уже бракованном изделии.

Предложен другой способ автоматизированной сборки ТВЭЛ. Способ позволяет контролировать не только суммарную длину топливного столба внутри ТВЭЛ, но и определять точное положение устанавливаемого компонента внутри ТВЭЛ, диагностировать и измерять образовавшийся зазор между устанавливаемыми компонентами. В случае если компонент не был доведен до нужного положения или зазор превышает допустимое значение, изделие отбраковывается. Отличие предлагаемого способа состоит в том, что в нем измерение длины устанавливаемых компонентов и в частности фрагментов топливного столба производят перед сборкой. Таким образом, длина всех устанавливаемых фрагментов известна перед загрузкой. В ходе установки контролируют три параметра:

- координата конца устанавливаемого компонента относительно выбранного начала координат;
- координата конца предыдущего установленного компонента относительно выбранного начала координат;
- длина устанавливаемого компонента.

Разработанный способ снаряжения столба топливных таблеток и комплектующих в открытый конец оболочки ТВЭЛ. Данный способ включает:

- установку комплектующих штоком, что позволяет унифицировать устройство для разнотипных компонентов и производить группу операций последовательно на одной сборочной позиции. Привод перемещения штока связан со следящей системой, что позволяет контролировать в процес-

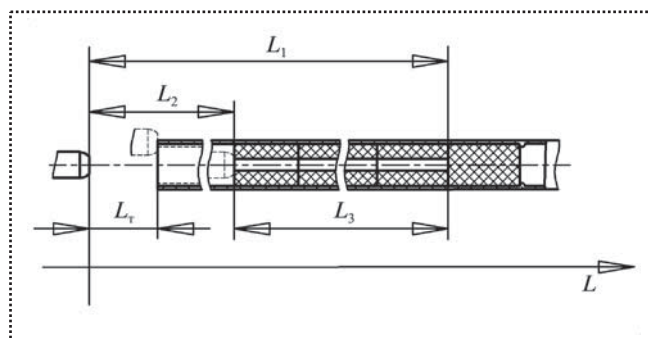


Рис. 3. Ось координат системы сборки

се сборки его положение. Все устанавливаемые компоненты перед установкой последовательно выводят в пространство между открытым торцом ТВЭЛ и торцом штока, затем заталкивают внутрь ТВЭЛ штоком;

- установку компонентов и проверку правильности их установки по оси координат, начало которой связывают с концом устанавливающего штока в задвинутом положении (рис. 3);
- фиксацию ТВЭЛ перед началом сборки;
- определение длины устанавливаемых компонентов, в том числе подобранных фрагментов топливных столбов;
- измерение координаты последнего установленного внутри ТВЭЛ компонента перед началом сборки;
- установку фрагментов топливных столбов и комплектующих, кроме пружинного фиксатора в "упор" с ограничением усилия, прикладываемого на шток. По достижению максимального усилия подача штока прекращается. Причиной достижения заданного усилия может быть как приход устанавливаемого компонента в заданную точку (компонент упирается в предыдущий установленный в ТВЭЛ компонент), так и его остановка в промежуточном положении из-за искривления ТВЭЛ и т.п. После завершения подачи штока считывают фактический ход конца штока относительно начала координат, который соответствует положению конца загружаемого компонента;
- установку пружинного фиксатора с ограничением усилия, прикладываемого на шток. Конец штока выводят в заданную координату, обеспечивая необходимое поджатие пружинного фиксатора. Шток останавливается, достигнув заданного усилия;



• контроль правильности установки компонентов.

1. Контроль зазоров между компонентами производят по трем координатам. На рис. 3 приведены эти координаты на примере установки первого фрагмента топливного столба: координата конца предыдущего установленного компонента (вставка 4, см. рис. 1) относительно начала координат L_1 , координата конца устанавливаемого компонента относительно начала координат L_2 , длина устанавливаемого компонента L_3 . Расчет зазора между компонентами

$$L_{\text{зав}} = L_1 - L_2 - L_3 .$$

При этом зазор между установленными компонентами должен быть меньше допустимого значения зазора L_d с учетом суммарной погрешности измерения $\Sigma \Delta L$

$$L_{\text{зав}} + \Sigma \Delta L < L_d .$$

ТВЭЛ, у которого зазор между компонентами больше допустимого значения с учетом погрешности измерения выводится в брак.

2. Контроль поджатия пружинного фиксатора. Контролируют длину пружинного фиксатора в сжатом состоянии L_{ϕ} . Контроль производят по двум координатам: координата конца предыдущего установленного компонента относительно выбранного начала координат L_1 и координата конца поджимаемого пружинного фиксатора относительно выбранного начала координат L_2 . Длина пружинного фиксатора в сжатом состоянии L_{ϕ} вычисляется по формуле: $L_{\phi} = L_1 - L_2$. Погрешность измерения должна быть меньше допуска на значение поджатия фиксатора.

3. Контроль положения верхней заглушки. Контролируют зазор между открытым концом ТВЭЛ и заплечиком верхней заглушки. Контроль производят по двум координатам: координата конца верхней заглушки относительно начала координат, координата открытого конца ТВЭЛ относительно начала координат L_T . Значение зазора должно быть в пределах допуска с учетом погрешности измерения.

При этом либо фиксируют открытый конец ТВЭЛ с помощью специальных средств в опреде-

ленном положении на расстоянии L_T относительно начала координат (конца устанавливающего штока в задвинутом положении), либо после фиксации ТВЭЛ измеряют координату открытого конца ТВЭЛ (размер L_T на рис. 3). Измерение могут производить устанавливающим штоком при смещении оси ТВЭЛ или специальным щупом.

Определение требуемой точности сборочного оборудования.

Для примера определим необходимую точность исполнительных механизмов сборочной системы для случая определения зазора между устанавливаемыми компонентами. Согласно формуле, приведенной ранее, зазор $L_{\text{зав}}$ между установленными компонентами должен быть меньше допустимого зазора L_d с учетом суммарной погрешности измерения $\Sigma \Delta L$:

$$L_{\text{зав}} + \Sigma \Delta L < L_d .$$

Суммарная погрешность измерения зазора будет складываться из погрешностей измерения трех погрешностей:

- измерения координаты конца предыдущего установленного компонента ΔL_1 ;
- измерения координаты конца установленного компонента ΔL_2 ;
- измерения длины устанавливаемого компонента ΔL_3 .

Тогда суммарная ошибка измерения

$$\Sigma \Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 .$$

Суммарная ошибка измерения системы сборки должна быть меньше допустимого значения зазора. Для ТВЭЛ реактора ВВЭР-1000 допустимый зазор между таблетками составляет 3 мм, а суммарный зазор между таблетками для всего топливного столба — не менее 8 мм [3]. Для корректной работы сборочной системы при допустимом зазоре 3 мм суммарная погрешность трех измерений $\Sigma \Delta L$ должна быть порядка 0,3 мм. Соответственно погрешность одного измерения — порядка 0,1 мм.

Точность разрешения современных датчиков перемещения составляет порядка 0,01 мм. Например, датчик ММЕ-MTS-AIF фирмы FESTO обеспечивает разрешение 0,01 и работает на длине до 2000 мм [5]. Ошибка измерения системы сборки



может быть проверена при испытаниях на контрольном образце. Как показали испытания, сборочная система, оснащенная подобными средствами измерений, разрешение которых на два порядка больше контролируемой величины, способна обеспечить требуемую точность и реализацию описанного способа.

Общий способ проведения сборочных операций с применением активного контроля. На основании способа, разработанного для сборки ТВЭЛ, можно сформулировать общий способ для проведения операции активного контроля при сборке изделий машиностроения. В данном способе контролируется одна линейная координата.

Способ включает:

- установку компонентов и проверку правильности их установки по оси координат, начало которой связывается с концом устанавливаемого штока (или любого другого устройства, с помощью которого происходит установка) в крайнем положении;
- фиксацию собираемого изделия в процессе сборки;
- определение координаты последнего установленного компонента относительно начала оси координат перед началом сборки;
- получение информации о длине каждого устанавливаемого компонента;
- установку компонентов с ограничением прикладываемой силы, по координате или в "упор". После завершения подачи считывается фактический ход конца штока (или любого другого устройства, с помощью которого происходит установка) относительно начала координат;
- контроль правильности установки компонентов. Контроль производят по координатам конца установленного компонента относительно начала

координат и конца предыдущего установленного компонента относительно начала координат, а также длине устанавливаемого компонента.

Заключение

В результате работы по данной теме разработан и описан способ сборки ТВЭЛ с применением методов активного контроля. Сделан вывод о возможности применения данного способа при сборке других изделий машиностроения. Продемонстрирована возможность реализации данного способа при помощи современных средств автоматизации. Применение методов активного контроля при автоматизированной сборке изделий позволяет выявлять брак непосредственно на самой сборке и своевременно выводить изделие из технологического потока, не производя с изделием лишние технологические переходы. Кроме того, отбраковка изделия на ранней стадии облегчает его последующую разборку и переработку. На основе предложенных решений возможен синтез новых технологических схем и их оптимизация.

Библиографический список

1. Пат. 2295786 РФ. Способ и устройство для изготовления незагрязненных мох-топливных стержней / А. Вандергейст, Ж. Хейлен, П. Артс. М., 2007.
2. Пат. 2397557 РФ. Способ изготовления тепловыделяющих элементов ядерного реактора / М.Г. Зарубин и др. М., 2010.
3. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов / Под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. Пат. 2156508 РФ. Способ и устройство снаряжения таблетками оболочек стержневых тепловыделяющих элементов / В.Л. Афанасьев и др. М., 2000.
5. URL: http://xdki.festo.com/xdki/data/doc_ENGB/PDF/EN/MLO-MME_EN.PDF.



УДК 621.757

Ю.З. Житников, д-р техн. наук*(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева),***Б.Ю. Житников**, д-р техн. наук *(Владимирский юридический институт)*

E-mail: kgta_tms@mail.ru

Сравнительный анализ достижимой точности способов обеспечения и контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами

Дан количественный анализ точности способов обеспечения и контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений.

The quantitative analysis of accuracy of ways of maintenance and control of axial forces of an inhaling of carving connections is given.

Ключевые слова: осевая сила, момент затяжки, резьбовое соединение, завинчивающее устройство, точность.

Keywords: axial force, the moment of an inhaling, carving connection, screwing up device, accuracy.

Известны следующие способы обеспечения и контроля осевых сил или моментов затяжки резьбовых соединений [5]:

- 1) по крутящему моменту затяжки;
- 2) по моменту отвинчивания;
- 3) по углу поворота резьбовой детали;
- 4) по величине деформации одной из резьбовых деталей;
- 5) при помощи шайб, по канавкам которых пропускается сжатый воздух;
- 6) по градиенту момента;
- 7) по удлинению резьбовой детали;
- 8) на основе комбинированного способа [3], при котором на первом этапе контроль затяжки осуществляют по крутящему моменту, а на этапе окончательной затяжки — по углу поворота резьбовой детали.

В серийном производстве при сборке изделий, узлы и детали которых скрепляют резьбовыми соединениями с помощью одношпиндельных гайковертов, нашли применение 1, 7 и 8-й способы обеспечения и контроля качества затяжки.

Дадим анализ достижимой точности затяжки резьбовых соединений с применением указанных способов.

Сборка резьбовых соединений и контроль качества затяжки по крутящему моменту на шпинделе гайковерта

Обеспечение и контроль качества затяжки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами может осуществляться по достижению требуемого значения крутящего момента при срабатывании муфт предельного момента либо по срабатыванию датчика момента, отключающего вращение двигателя.

Погрешности осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами при обеспечении и контроле качества затяжки по крутящему моменту находятся из выражения [3]:

$$\delta Q = \sqrt{\delta Q_{\Delta\omega}^2 + \delta Q_{\Delta k}^2 + \delta Q_{\Delta M}^2 + \delta Q_{\Delta c}^2 + \delta Q_{\Delta p.c}^2 + \delta Q_{\Delta o}^2 + \delta Q_n^2}, \quad (1)$$

где $\delta Q_{\Delta\omega}$ — погрешность угловой скорости вращения шпинделя;

$\delta Q_{\Delta k}$ — кинематическая погрешность в передаточном механизме гайковерта;

$\delta Q_{\Delta M}$ — погрешность крутящего момента на валу двигателя;

$\delta Q_{\Delta c}$ — погрешность сопротивления в передаточном механизме;

$\delta Q_{\Delta p.c}$ — погрешность сопротивления в резьбовых соединениях;

$\delta Q_{\Delta o}$ — погрешность момента отключения муфты предельного момента;

δQ_n — погрешность настройки гайковерта на требуемое значение.

Настройка гайковерта на требуемые параметры затяжки позволяет свести к минимуму систематические погрешности от приведенного момента инерции вращающихся элементов гайковерта к оси шпинделя, от неточности изготовления элементов муфты предельного момента, от номинального значения угловой скорости вращения в момент начала затяжки резьбового соединения.



Таблица 1

Параметры одношпиндельных гайковертов и резьбовых деталей

Параметр	Приведенный момент инерции I_z , Н·м ²	Угловая скорость вращения шпинделя ω , с ⁻¹	Площадь сечения тела болта F_6 , см ²	Модуль упругости материала болта E_6 , МПа	Шаг резьбы P , см	Момент затяжки резьбового соединения M , Н·м	Осевая сила затяжки Q , кН	Длина растягиваемой части резьбовой детали l_6 , см
Значение	$2,82 \cdot 10^{-3}$	6,28	1,13	$2 \cdot 10^5$	0,15	95	36,8	1,00
Допустимое отклонение	$8,4 \cdot 10^{-5}$	0,314	0,024	$0,05 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	—	—	0,02

Для параметров одношпиндельных гайковертов и резьбовых деталей, указанных в табл. 1, приведем значения погрешностей осевых сил затяжки, кН:

От нестабильности угловой скорости вращения шпинделя $\delta Q_{\Delta\omega}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
От кинематической погрешности в передаточном механизме $\delta Q_{\Delta\kappa}$	0,070
От нестабильности крутящего момента двигателя $\delta Q_{\Delta M}$	1,654
От нестабильности момента сопротивления в передаточном механизме $\delta Q_{\Delta c}$	0,191
От нестабильности момента сопротивления в резьбе $\delta Q_{\Delta p, c}$	8,312
От нестабильности момента отключения муфты предельного момента $\delta Q_{\Delta o}$	2,020
От настройки гайковерта на требуемое значение δQ_n	0,736

Суммарная погрешность осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами $\delta Q_{\Sigma} = 9,451$ кН, что составляет 25,68 % от номинального значения осевой силы затяжки.

Эти значения погрешностей близки к значениям, полученным в работах [1–3].

Ряд авторов стремятся уменьшить погрешности осевых сил затяжки за счет стабилизации крутящего момента двигателя. Но от нестабильности крутящего момента двигателя погрешность составляет порядка 4 % от номинального значения.

Как следует из приведенных ранее данных, основная погрешность осевых сил затяжки возникает от нестабильности моментов сопротивления в резьбовых соединениях, а особенно – от качества резьбовых поверхностей, нестабильности коэффициентов трения в резьбе и на торце головки болта из-за попадания на их поверхности влаги, смазки.

Осевую силу затяжки резьбового соединения находят из выражения [5]:

$$Q = \frac{M_3}{\left[\frac{1}{3} \mu_T \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} + \frac{d_2}{2} \operatorname{tg} \left(\frac{P}{\pi d_2 + \rho} \right) \right]}, \quad (2)$$

где μ_T – коэффициент трения на торце головки болта;

D – диаметр головки болта под ключ;

d_0 – диаметр тела болта;

d_2 – средний диаметр резьбы;

P – шаг резьбы;

ρ – угол трения в резьбовом сопряжении.

Погрешности осевых сил затяжки от нестабильности моментов сопротивления в резьбовых соединениях составляют 22,6 %, что также подтверждается многими исследованиями и в частности работами [1–3].

Использование датчиков моментов для обеспечения отключения двигателя гайковерта при достижении требуемого момента затяжки позволяет исключить погрешность нестабильности срабатывания муфты предельного момента, но вносит погрешность от нестабильности срабатывания датчика, которая составляет порядка 2 % от номинального значения момента затяжки.

В этом случае суммарная погрешность осевых сил затяжки резьбовых соединений достигает $\delta Q_{\Sigma} = 9,245$ кН, что составляет 25,12 % от номинального значения.

Существенно повысить точность осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами возможно только путем частичного или полного исключения погрешностей от нестабильности моментов сопротивления в резьбовых соединениях.

Контроль качества затяжки резьбовых соединений по удлинению резьбовой детали

Как правило, обеспечение и контроль затяжки резьбовых соединений по удлинению резьбовой детали осуществляются вручную.

Удлинение растягиваемой части резьбовой детали согласно [6] находится из выражения

$$\lambda = \frac{Q l_6}{E_6 F_6}, \quad (3)$$

где Q – сила растяжения;



Параметры резьбовой детали и физико-механические свойства материала

Параметр	Диаметр тела резьбовой детали d_0 , см	Модуль упругости материала резьбовой детали E_6 , МПа	Величина удлинения растягиваемой части резьбовой детали λ , см	Длина растягиваемой части резьбовой детали l_6 , см
Номинальное значение	1,2	$2 \cdot 10^5$	0,0094	1,0
Допустимое отклонение	0,0035...0,0240	$0,05 \cdot 10^5$	0,0002	0,02

l_6 – длина растягиваемой части (равна сумме толщин уплотнения и скрепляемого фланца);

E_6 – модуль упругости материала резьбовой детали;

F_6 – площадь сечения резьбовой детали.

Погрешности осевых сил затяжки резьбовых соединений при обеспечении и контроле качества затяжки по удлинению находятся из выражения:

$$\delta Q = \sqrt{\delta Q_{\Delta d_0}^2 + \delta Q_{\Delta E_6}^2 + \delta Q_{\Delta \lambda}^2 + \delta Q_{\Delta l_6}^2} + \delta Q_n \quad (4)$$

Согласно параметрам резьбовой детали и физико-механических свойств материала (табл. 2) погрешности осевых сил затяжки составят, кН:

От нестабильности диаметра резьбовой детали $\delta Q_{\Delta d_0}$	0,667...4,575
От нестабильности модуля упругости материала резьбовой детали $\delta Q_{\Delta E_6}$	1,430
От неточности измерения удлинения резьбовой детали $\delta Q_{\Delta \lambda}$	1,220
От нестабильности растягиваемой части резьбовой детали $\delta Q_{\Delta l_6}$	1,144
От настройки гайковерта δQ_n	0,383

Для гостированных отклонений параметров и физико-механических свойств резьбовых деталей погрешности осевых сил затяжки при контроле качества сборки по удлинению резьбовой детали $\delta Q = 5,46$ кН, что составляет 14,836 % от номинального значения.

Погрешности осевых сил затяжки по сравнению со способом обеспечения и контроля качества сборки по моменту [2, 4] почти в два раза меньше.

Но если ужесточить допустимые отклонения диаметра d_0 растягиваемой части резьбовых деталей до 0,035 мм, то погрешности осевых сил могут составить $\delta Q = 2,299$ кН, что соответствует погрешности в 6,247 % от номинального значения.

Экспериментально подтверждено хорошее совпадение значений погрешностей осевых сил затяжки с расчетными значениями.

Тем не менее следует обратить внимание, что данный способ обеспечения и контроля качества затяжки

может применяться только для шпилечных соединений, где удлинение можно измерить, а механизация или автоматизация этого процесса связана с большими трудностями.

Комбинированный способ обеспечения и контроля качества затяжки резьбовых соединений

Комбинированный способ обеспечения и контроля качества затяжки [3, 4] основан на предварительной затяжке резьбовых соединений с контролем по моменту и окончательной затяжке с контролем по углу поворота резьбовой детали.

Если назначить момент предварительной затяжки резьбовых соединений в пределах 5 % от номинального значения, то при контроле качества затяжки по моменту погрешности осевых сил затяжки с учетом того, что $\delta Q_{\Sigma} = 9,451$ кН, составят 25,68 % от заданного момента, т.е. в пересчете – $\Delta Q_{np} = 1,84$ кН, что соответствует погрешности в 5 % от номинального значения.

Оценим погрешности осевых сил затяжки резьбовых соединений при контроле качества по углу поворота резьбовой детали.

Согласно выражению (3) зависимость осевой силы затяжки от угла поворота резьбовой детали запишется как

$$\varphi = \frac{2 \pi Q_0 l_6}{E_6 F_6 P},$$

где Q_0 – осевая сила окончательной затяжки;

P – шаг резьбы.

На этапе окончательной затяжки с контролем качества сборки по углу поворота резьбовой детали погрешность осевых сил

$$\delta Q_0 = \sqrt{\delta Q_{\Delta \varphi}^2 + \delta Q_{\Delta d_0}^2 + \delta Q_{\Delta E_6}^2 + \delta Q_{\Delta P}^2 + \delta Q_{\Delta l_6}^2} + \delta Q_n.$$



Таблица 3

Параметры резьбовой детали

Параметр	Угол затяжки резьбового соединения φ	Диаметр тела резьбовой детали d_0 , см	Модуль упругости материала резьбовой детали E_6 , МПа	Шаг резьбы P , см	Длина растягиваемой части резьбовой детали l_6 , см
Номинальное значение	3,9°	1,2	$2 \cdot 10^5$	0,15	1,0
Допустимое отклонение	0,0029 рад	0,0035...0,0260	$0,05 \cdot 10^5$	0,00245	0,02

Для параметров резьбовой детали (табл. 3) погрешности осевых сил затяжки на этапе окончательной затяжки резьбовых соединений при контроле качества сборки по углу поворота составят, кН:

От неточности измерения угла затяжки $\delta Q_{\Delta\varphi} \dots \dots \dots 1,566$
 От нестабильности диаметра резьбовой детали $\delta Q_{\Delta d_0} \dots \dots \dots 0,214 \dots 1,590$
 От нестабильности модуля упругости материала резьбовой детали $\delta Q_{\Delta E_6} \dots \dots \dots 0,920$
 От нестабильности шага резьбы $\delta Q_{\Delta P} \dots \dots \dots 0,957$
 От нестабильности растягиваемой части резьбовой детали $\delta Q_{\Delta l_6} \dots \dots \dots 0,736$
 От настройки гайковерта $\delta Q_H \dots \dots \dots 0,736$

Погрешности осевых сил на этапе окончательной затяжки с контролем качества сборки по углу поворота резьбовой детали $\delta Q_0 = 2,696$ кН, что соответствует погрешности в 7,326 % от номинального значения.

Суммарные погрешности осевых сил затяжки на- ходят из выражения:

$$\delta Q_{\Sigma} = \sqrt{\delta Q_{\text{пр}}^2 + \delta Q_0^2} = 3,266 \text{ кН,}$$

что составляет 8,875 % от номинального значения.

Для повышения точности обеспечения и контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений следует ужесточить допустимое отклонение диаметра резьбовой детали d_0 до 0,0035 см.

В этом случае суммарная погрешность составит $\delta Q_{\Sigma} = 2,861$ кН, что соответствует погрешности в 7,774 % от номинального значения.

Кинематическая схема одношпиндельного гайковерта на основе комбинированного способа обеспечения и затяжки резьбовых соединений представлена в патенте [7] и статье [8].

Как следует из анализа:

1) самой низкой точностью осевых сил затяжки обладают одношпиндельные гайковерты на основе способа обеспечения и контроля качества сборки по моменту затяжки, погрешности осевых сил затяжки которых составляют не менее 25 % от номинального значения. Этими гайковертами следует пользоваться

в тех случаях, когда не оговаривается точность обеспечения осевой силы или момента затяжки;

2) способ обеспечения и контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений по удлинению резьбовой детали обладает наибольшей точностью, погрешности составляют порядка 6,3 % от номинальных значений. Но для обеспечения такой точности необходимо обеспечивать изготовление диаметра растягиваемой части резьбовой детали с погрешностью не более 0,035 мм. Кроме того, данный способ имеет ограниченное применение, так как может использоваться только при сборке шпилечных соединений;

3) высокую точность осевых сил затяжки резьбовых соединений обеспечивает комбинированный способ, при котором погрешности составляют порядка 8...9 % от номинального значения. Кроме того, данный способ не имеет ограничений при использовании его в сборочном производстве и не вызывает трудностей механизации и автоматизации процесса сборки.

Библиографический список

1. Гельфанд М.Л., Ципенюк Я.И., Кузнецов О.К. Сборка резьбовых соединений. М.: Машиностроение, 1978. 109 с.
2. Гусев А.А. Автоматизация сборочных работ. М.: Машиностроение, 1976. 62 с.
3. Воркуев Д.С. Разработка семейства высокоточных многошпиндельных гайковертов нового класса на основе одного привода / Д.С. Воркуев, Ю.З. Житников; под общ. ред. Ю.З. Житникова. М.: Машиностроение, 2009. 204 с.
4. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебн. для машиностроит. вузов / Ю.З. Житников и др. под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.
5. Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В. Затяжка и стопорение резьбовых соединений. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 244 с.
6. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1970. 595 с.
7. Пат. РФ № 2473417. Гайковерт / Ю.З. Житников и др. Б.И. 2013. № 3.
8. Житников Ю.З. Ручные одношпиндельные гайковерты на основе муфт предельного момента повышенной точности осевых сил затяжки // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2012. № 4. С. 25–30.

Исследование гидропрессового способа сборки-разборки конических соединений с увеличенными натягами

Исследован гидропрессовый способ сборки-разборки конических соединений с увеличенными натягами, вызывающими упругопластические деформации в охватываемой детали. Определены варьируемые параметры и области их изменений. Приведены результаты экспериментальных исследований. Установлены регрессионные уравнения взаимосвязи исследуемых параметров.

The hydropress way of assembly dismantling of conic connections with the increased tightnesses, causing the elastic and plastic of deformations in a covering detail is investigated. Varied parameters and areas of their changes are determined. Results of pilot studies are given. The regression equations of interrelation of studied parameters are established.

Ключевые слова: коническое соединение с натягом, сборка-разборка, гидропрессовый способ, упругопластические деформации, регрессионное уравнение.

Keywords: conic connection with a tightness, assembly dismantling, hydropress way, elastic and plastic deformation, regression equation.

Введение

Гидропрессовый способ (ГПС) сборки соединения с натягом (СН), обеспечивается нагнетанием рабочего тела (РТ) в зону сопряжения деталей либо с торца соединения, либо через канавку, расположенную на одной из сопрягаемых поверхностей. Это позволяет разделить сопрягаемые поверхности деталей СН пленкой РТ, что уменьшает силы трения, препятствующие смещению деталей [1] и тем самым снижает усилие монтажа-демонтажа соединения.

Разделение сопрягаемых поверхностей деталей СН пленкой РТ характеризует процесс их "гидро-распора" (ГР). Наиболее эффективен ГПС при сборке и разборке конических соединений с натягом (КСН). Подача РТ в зону сопряжения КСН

даже при малой конусности ($c = 1/100$), нарушает условие самоторможения соединения и обеспечивает его разборку без приложения внешнего сдвигающего усилия. При этом обеспечивается высокая производительность процесса и отсутствие повреждений сопрягаемых поверхностей. Кроме того, ГПС сборки обеспечивает принципиальную возможность получения сопряжения с любым, определяемым давлением РТ, натягом. Исследованию ГПС сборки-разборки КСН с увеличенными натягами, как одному из технологических способов повышения их несущей способности, посвящена настоящая работа.

Расчет на прочность деталей КСН

При сборке-разборке КСН гидропрессовым способом расчет на прочность деталей определяется условием

$$\sigma_{es(i)} = (\sigma_{\theta i}^2 + \sigma_r^2 - \sigma_{\theta i} \sigma_r)^{1/2} \leq \sigma_{adm(i)}, \quad (1)$$

где σ_{θ} , σ_r – окружные и радиальные напряжения на сопрягаемой поверхности деталей КСН (для осевых напряжений в запас прочности принято $\sigma_z = 0$);

$\sigma_{adm} = \sigma_T / n$ (σ_T – предел текучести материала; $n = 1,2...1,4$ – запас прочности) [1];

индекс i здесь и далее определяет охватываемую ($i = 1$) и охватываемую ($i = 2$) детали.

Условие прочности (1) определяется соотношением взаимосвязанных и изменяемых в широких пределах конструктивных и технологических параметров, а также наличием субъективного человеческого фактора, определяющего режим ГПС сборки-разборки КСН. Поэтому фактический уровень эквивалентных напряжений σ_{es} имеет значительную степень неопределенности

$$\sigma_{es} = \sigma_{es}(\delta, k_{ri}, k_{\theta i}, k_{zi}, \mu, \nu, q),$$



где δ – радиальный натяг – является расчетным, по условию обеспечения несущей способности, параметром, изменяется в пределах заданных допустимых отклонений $\delta = \delta(z)$;

k_{ri} – коэффициенты радиальной формы, характеризующие радиальные жесткости деталей КСН, $k_{ri} = d_{i \min} / d_{i \max}$;

$k_{zi}, k_{\theta i}$ – коэффициенты осевой и окружной формы, характеризующие влияние геометрических параметров деталей КСН на процесс ГР, $k_{zi} = l / d_{i \max}$, $k_{\theta i} = k_{ri}(\theta)$;

μ – коэффициент трения, зависящий от состояния сопрягаемых поверхностей, $\mu = \mu(z)$;

ν – кинематическая вязкость РТ при давлении σ_r и температуре t , $\nu = \nu_0 \exp[\alpha \sigma_r - \beta(t - t_0)]$ (ν_0 – кинематическая вязкость РТ при температуре t_0 ; α, β – коэффициенты; l, d – длина и диаметр сопрягаемой поверхности КСН);

q – погонный расход РТ, $q = Q / \pi d$ (Q – расход РТ обеспечиваемый источником высокого давления).

В работе [1] представлены экспериментальные исследования по определению зависимости $\sigma_{r \max} = \sigma_{r \max}(\delta, k_{ri}, k_{zi}, Q)$ при выполнении условия (1). Результаты этих исследований позволяют определить взаимосвязанные с ними параметры ГПС разборки, в частности:

T – время разборки КСН;

$\langle Z' \rangle$ – среднюю скорость распространения РТ по сопряжению КСН, $\langle Z' \rangle = l_r / T$;

\bar{N} – погонную мощность, необходимую для ГПС разборки КСН, $\bar{N} = Q \sigma_{r \max} / \pi d$.

Определение параметров ГПС сборки-разборки КСН

Данную работу выполняли при условиях осесимметричного напряженно-деформированного состояния охватывающей детали и отсутствия изгиба – $\sigma_z(z) = 0$. Кроме того, принималось, что условия распространения РТ по стыку КСН симметричны, т.е. одинаковы в обоих направлениях. В этом случае справедливо, что

$$T = V_\delta / Q, \quad (2)$$

где V_δ – объем зазора в КСН при ГР, $V_\delta = \frac{\pi d}{R} \int_{l_r} [\sigma_r(z) - \sigma_{r\delta}(z)] dz$;

R – радиальная жесткость КСН при раскрытии стыка, принимая $k_{r1} = 0$, $R = \frac{E}{d}(1 - k_{r2}^2)$;

$\sigma_{r\delta}(z)$ – радиальные напряжения на сопрягаемой поверхности от натяга в предположении упругого деформирования материала;

l_r – длина раскрытого ГР участка стыка КСН;

E – модуль Юнга.

Разборка КСН при ГПС происходит в момент нарушения условия самоторможения

$$c \int_l \sigma_r(z) dz \leq 2 \int_l \mu(z) \sigma_p(z) dz. \quad (3)$$

С достаточной точностью можно принять [2]:

$$\sigma_r(z) = \sigma_{r\delta} H(l_\mu) + \sigma_{r \max} H(l_r); \quad (4)$$

$$\mu(z) = \langle \mu \rangle H(l_\mu) + \mu_r H(l_r), \quad (5)$$

где $H(\dots)$ – функция Хевисайда;

l_μ – длина не раскрытого ГР участка стыка КСН;

$\langle \mu \rangle = (\mu_0 + \mu_r) / 2$ – усредненный коэффициент трения на участке l_μ ;

μ_r – коэффициент трения на участке l_r ($\mu_r \leq \mu_0$);

μ_0 – коэффициент трения при исходном состоянии сопрягаемых поверхностей.

С учетом формулы (5), оставляя в соотношении (3) знак равенства, получаем:

$$l_r = \frac{1}{1 + \psi \bar{\sigma}_{r \max}} l, \quad (6)$$

где $\psi = \frac{1}{\mu_0 / c - 1}$.

С учетом формул (4) и (6) соотношение (2) можно представить в виде

$$T = \frac{l}{\langle Z' \rangle} \frac{1}{1 + \psi \bar{\sigma}}, \quad \text{где } \langle Z' \rangle = \frac{Rq}{\sigma_0(\bar{\sigma} - 1)}. \quad (7)$$

Значения $T(q)$, $\langle Z' \rangle(q)$, $\bar{N}(q)$, $\sigma(q)$ для различных вязкостей масла, сочетаний технологических факторов и конструктивных параметров, полученные с использованием экспериментальных данных [1] и соотношения (7) представлены на рис. 1. Из анализа расчетных значений выявляется их взаимозависимость, что проявляется в существенной дисперсии. Это предопределяет неопределенность в обеспечении условия (1). С увеличением натягов, в случае сборки КСН ГПС, условие (1) не выпол-

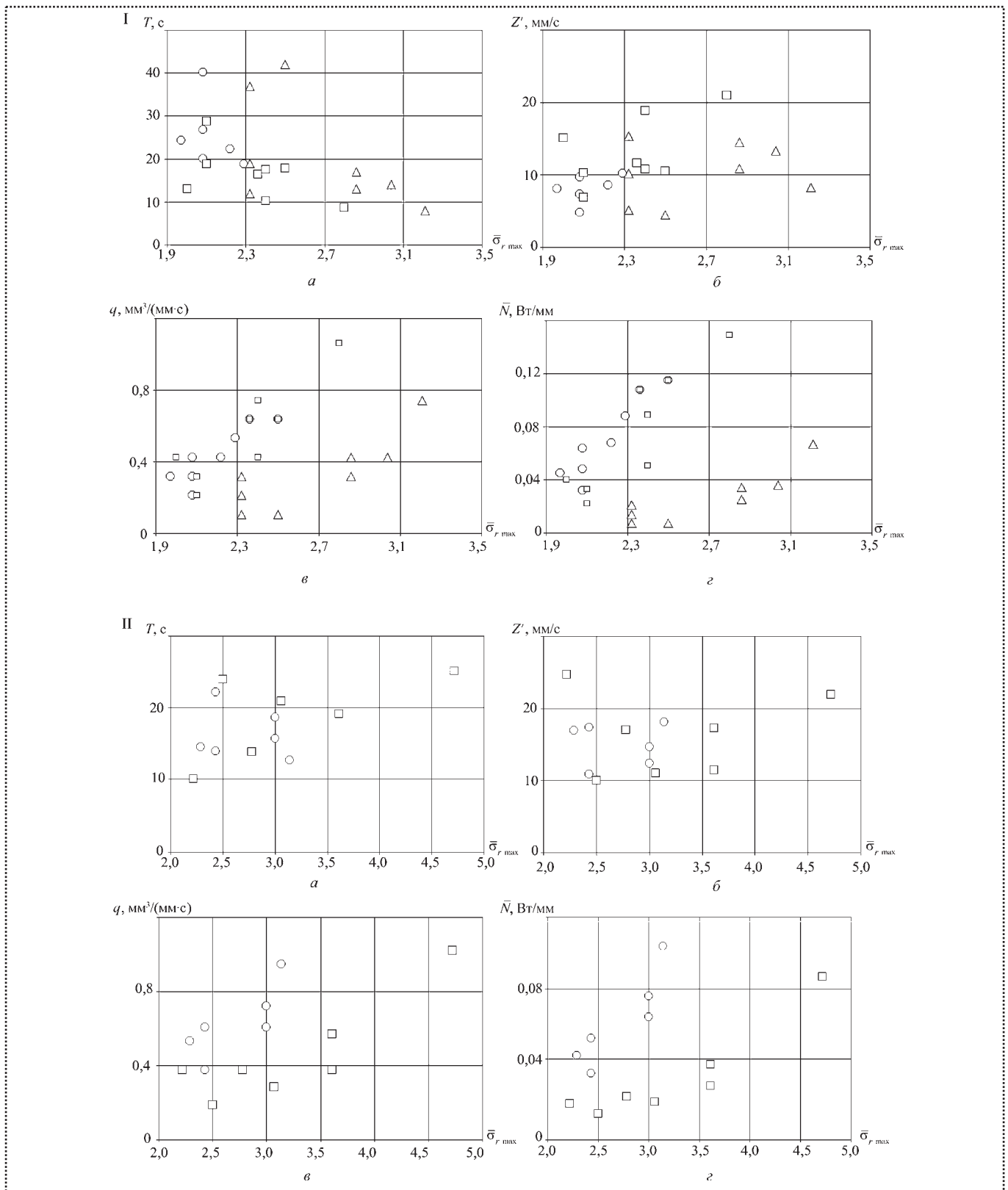


Рис. 1. Изменения параметров ГПС сборки-разборки КСН ($a - T$; $b - Z'$; $v - q$; $z - \bar{N}$) в зависимости от значения относительного давления РТ $\bar{\sigma}_{r \max}$ при:

I - $k_z = 0,885$; $k_r = 0,557$: $\circ - \sigma_\delta = 72$ МПа; $\square - \sigma_\delta = 50$ МПа; $\triangle - \sigma_\delta = 28$ МПа;

II - $k_z = 2,25$; $k_r = 0,632$: $\circ - \sigma_\delta = 35$ МПа; $\square - \sigma_\delta = 18$ МПа;

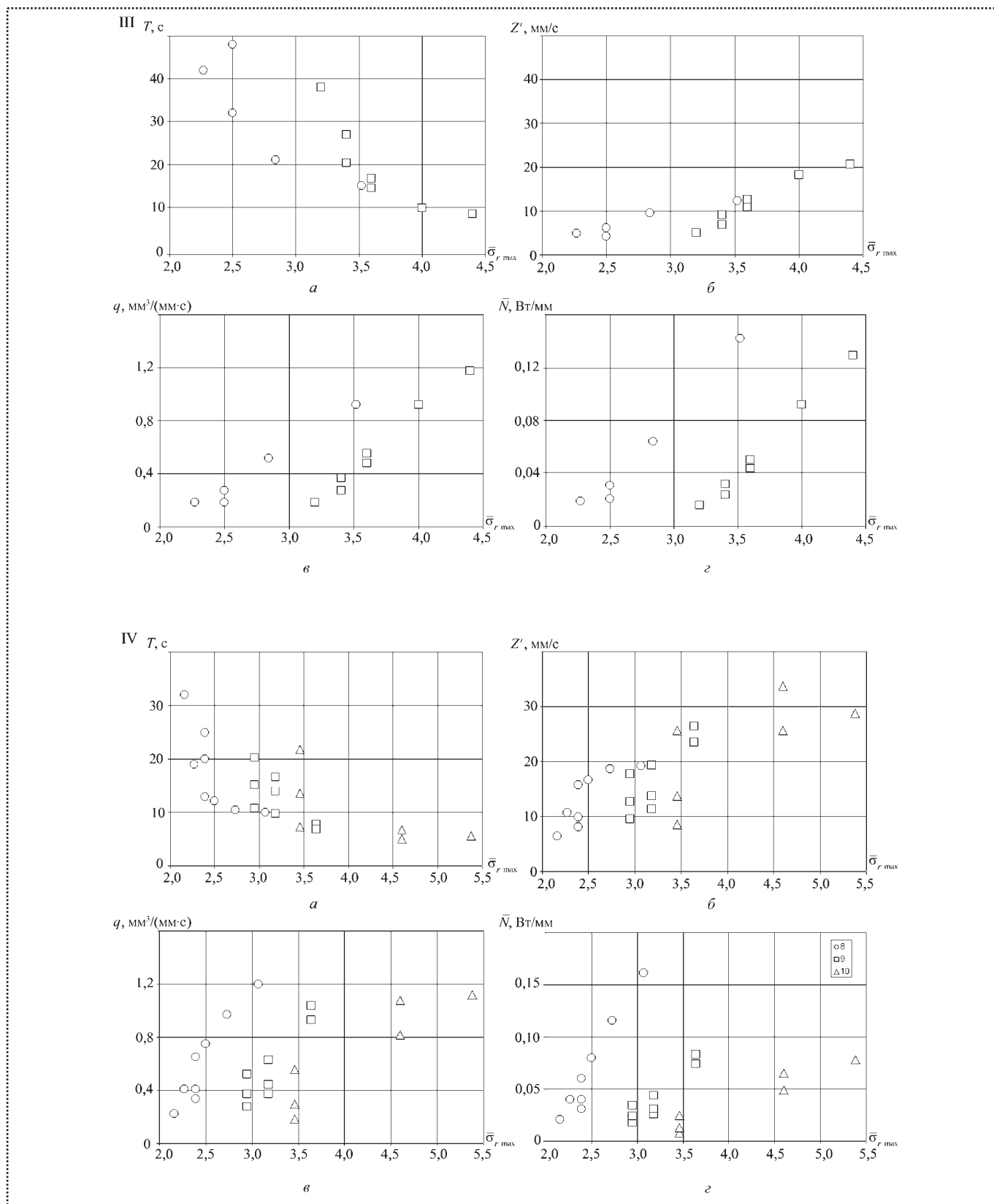


Рис. 1. Окончание

III – $k_z = 1,724$; $k_r = 0,597$: \circ – $\sigma_\delta = 44$ МПа; \square – $\sigma_\delta = 25$ МПа; IV – $k_z = 1,785$; $k_r = 0,611$: \circ – $\sigma_\delta = 44$ МПа; \square – $\sigma_\delta = 22$ МПа; \triangle – $\sigma_\delta = 13$ МПа



няется, что соответствует возникновению пластических деформаций в деталях КСН.

Исследования параметров ГПС сборки-разборки КСН с увеличенными натягами

Данные исследования проводились для натягов, при которых соотношение (1) принимало вид $\sigma_{es(i)} \geq \sigma_{adm(i)}$. Напряжения, входящие в соотношение (1), для случая $k_{r1} = 0$, определяются как

$$\sigma_{r\delta} = -\frac{\delta E(1-k_{r2}^2)}{2d}, \quad \sigma_{\theta} = \sigma_{r\delta} \frac{(1+k_{r2}^2)}{(1-k_{r2}^2)}. \quad (8)$$

Подставляя эти соотношения в выражение (1), приравнявая допускаемые напряжения пределу текучести $\sigma_{adm(2)} = \sigma_T$ и произведя преобразования, определим значение натяга, при котором в охватываемой детали возникают пластические деформации $\delta_T = 2d \frac{\sigma_T}{E} (3+k^4)^{-1/2}$. При $k = 0,5 \pm 0,3$ ошибка

в определении σ_T по этому соотношению составляет $\pm 3\%$. Поэтому при $E = 2,1 \cdot 10^5$, можно принять $\delta_T = 0,544 d \sigma_T 10^{-5}$.

Это соотношение было использовано для определения относительного натяга $\bar{\delta} = \delta / \delta_T$. Входящая в это соотношение величина σ_T определялась по приближенной эмпирической зависимости, связывающей твердость материала и его предел текучести: $\sigma_T = 0,367 \text{ НВ} - 240$, МПа [3].

Приведенная зависимость распространяется на конструкционные углеродистые и перлитные легированные стали, к которым относится использованная в опытах сталь 40Х. Твердость материала контролировали на приборе ТМ-2М в шести точках на торцах образцов. Необходимо отметить, что диапазон изменения относительных натягов в исследованиях, результаты которых представлены на рис. 1, составлял $0,06 \leq \bar{\delta} \leq 0,32$. Значение этого параметра для КСН, применяемых, например, в тяговых приводах тепловозов, находится в пределах $0,17 \leq \bar{\delta} \leq 0,70$.

Исследования для КСН с увеличенными натягами, $\bar{\delta} \geq 0,70$, проводили с использованием планирования эксперимента [4]. Принятая модель активного эксперимента имела ортогональный план полнофакторного эксперимента типа 2^3 с функци-

Таблица 1

Размеры охватываемой детали

Точки		l, мм	d _{2max} , мм
X ₁	X ₂		
+1	+1	116	140
-1	-1	82,5	165
+1	-1	70	140
-1	+1	135	165
0	0	100	152

ей отклика $\bar{\sigma}_r \rightarrow y$ и варьируемыми факторами: $k_z \rightarrow x_1$, $k_r \rightarrow x_2$, $\bar{\delta} \rightarrow x_3$.

Переход к безразмерным значениям задается соотношением

$$X_i = \frac{x_i - \langle x_i \rangle}{\Delta x_i},$$

где Δx_i – интервал варьирования фактора, $\Delta x_i = \langle x_i \rangle - x_{i \min} = x_{i \max} - \langle x_i \rangle$;

$\langle x_i \rangle$ – средние значения варьируемых факторов.

Интервалы варьирования, средние значения безразмерных факторов и размеры охватываемой детали для различных точек ортогонального плана представлены в табл. 1 и 2. При $c = 1/50$ среднее значение диаметра сопрягаемой конической поверхности определялось как $d_{2 \min} = 98,5$ мм.

Функция отклика принята в виде

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 3} b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} b_{ij} X_i X_j + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (9)$$

где $b_0 = \frac{1}{8} \sum_{m=1}^8 \langle Y_m \rangle$, $b_{ij} = \frac{1}{8} \sum_{m=1}^8 X_{im} X_{jm} \langle Y_m \rangle$,

$b_{123} = \sum_{m=1}^8 X_1 X_2 X_3 \langle Y_m \rangle$; m – номер строки матрицы

Таблица 2

Интервалы варьирования и средние значения варьируемых факторов

Фактор	Δy_i	$\langle x_i \rangle$
x ₁	0,160	0,66
x ₂	0,054	0,66
x ₃	0,200	1,00



планирования полного факторного эксперимента, типа 2^3 [4].

В качестве отклика было выбрано безразмерное соотношение $Y \rightarrow \sigma_{r, \max} / \sigma_{r, el}$, где $\sigma_{r, el}$ – радиальные напряжения на внутренней поверхности охватываемой детали, определенные по формуле (8) для заданного натяга из предположения упругого деформирования материала.

В каждой точке плана испытывали от 2 до 5 образцов. Функции отклика Y_1 , Y_2 определяли для вязкостей РТ 30 и 70 мм²/с. После оценки по критерию Стьюдента значимости коэффициентов уравнения (9) при уровне надежности 0,9 было получено:

$$Y_1 = 1,279 - 0,016 X_2 - 0,134 X_3 + 0,043 X_1 X_2 - 0,038 X_1 X_3 ;$$

$$Y_2 = 1,415 - 0,03 X_1 + 0,015 X_2 - 0,13 X_3 + 0,01 X_2 X_3 .$$

В натуральных выражениях эти зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} y_1 &= 3,528 - 2,097 x_1 - 3,581 x_2 + 0,1137 x_3 + \\ &+ 4,977 x_1 x_2 - 1,187 x_1 x_3 ; \\ y_2 &= 3,73 - 1,875 x_1 - 0,6481 x_2 - \\ &- 1,261 x_3 + 0,9259 x_2 x_3 . \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты исследований в координатах $\bar{\sigma}_{r, \max}$, $\bar{\delta}$ для вязкостей 30 и 70 мм²/с в диапазоне $0,8 \leq \bar{\delta} \leq 1,2$ представлены на рис. 2. Верхний уровень указанного диапазона был определен из условия не превышения заданного уровня остаточных деформаций в охватываемой детали.

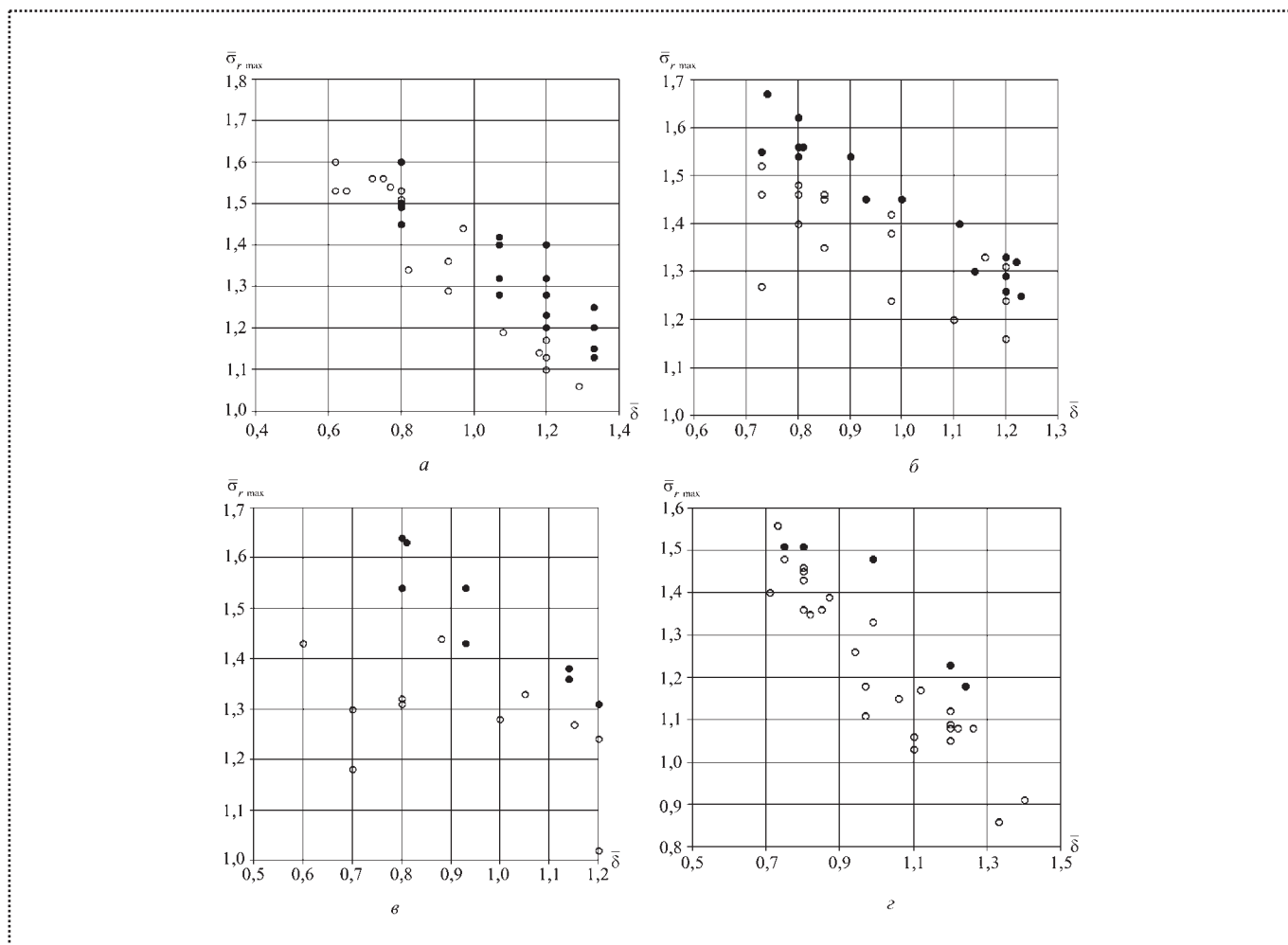


Рис. 2. Изменения относительного давления $\bar{\sigma}_{r, \max}$ при ГПС сборки-разборки КСН с увеличенными натягами в зависимости от относительной величины $\bar{\delta}$: (○ → $\nu = 30$ мм²/с; ● → $\nu = 70$ мм²/с):

$a - k_z = 0,82$; $k_r = 0,714$; $б - k_z = 0,82$; $k_r = 0,606$; $в - k_z = 0,50$; $k_r = 0,714$; $г - k_z = 0,82$; $k_r = 0,714$



Технологическая система ГПС сборки-разборки СН и КСН

Входными параметрами системы являются: технологическое оборудование, технологические режимы, конструктивные параметры, параметры погрешности формы сопрягаемой поверхности, механические свойства материала и т.д. Важнейшим выходным параметром системы является ее технологическая надежность.

В проведенных исследованиях показана взаимосвязь входных параметров, причем эти параметры обладают значительной степенью неопределенности. Эта неопределенность формирует неопределенность выходного параметра – технологической надежности.

Технологическая надежность с заданной вероятностью отказа включает в себя:

- выполнение технологического процесса сборки-разборки КСН;
- сохранение параметров соединения в пределах допустимых предельных состояний.

Последнее может быть определено условием не превышения значений технологических параметров их предельных значений $S_i \leq [S_i]$. Таким условием, например, является соотношение (1) или аналогичное ему соотношение $\bar{\delta} \leq 1,2$.

В качестве обобщенного параметра, определяющего технологическую надежность ГПС сборки-разборки СН и КСН может быть выбрана мощность применяемого технологического оборудования. Превышение номинальной мощности повышает вероятность отказа, а недостаточная мощность снижает его эффективность. Характеристики оборудования и рекомендации по его применению для ГПС сборки-разборки КСН с различными геометрическими размерами в зависимости от d_{2min} представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Характеристики оборудования

Тип	Оборудование	N, Вт	p_{max} , МПа	Q_{max} , мм ³ ·с ⁻¹
1	Мультипликатор [1]	30	250	350
2	SKF 226400	30	300	460
3	SKF226400/400	30	400	460
4	НЭР250-0,1Ф4Т2	300	250	1600

Таблица 4

Рекомендации по применению оборудования для ГПС сборки-разборки КСН в зависимости от значения d_{2min}

d_{2min} , мм	N, Вт	Тип
40...80	6...12	1, 2, 3
80...160	12...24	1, 2, 3
160...320	24...48	1, 2, 3, 4*

*С осторожностью

Выводы

1. Параметры ГПС сборки-разборки КСН обладают значительной неопределенностью, что предопределяет возможность возникновения упругопластических деформаций в его деталях.

2. При ГПС сборки-разборки КСН с увеличенными натягами в его деталях возникают пластические деформации.

3. Сборка-разборка ГПС КСН с увеличенными натягами не приводит к пропорциональному увеличению необходимого для этого гидростатического давления.

4. При сборке-разборке КСН ГПС предельное значение относительного натяга, по условию невышшения значения остаточных деформаций, может быть определено как $\bar{\delta} \leq 1,2$.

5. Взаимозависимость параметров ГПС сборки-разборки КСН в диапазоне относительных натягов $0,8 \leq \bar{\delta} \leq 1,2$ может быть представлена регрессионным уравнением.

6. Технологическая надежность КСН с увеличенными натягами, при его ГПС сборки-разборки, может быть обеспечена невышшением установленной мощности технологического оборудования.

Библиографический список

1. Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом: расчет, проектирование, изготовление. М: Машиностроение, 1981. 247 с.
2. Заярный С.И. Имитационные модели гидропрессования конического соединения с гарантированным натягом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/256412.html> (дата обращения 20.12.2011).
3. Марковец М.П. Определение механических свойств металла по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.
4. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб.пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.

УДК 621.643.43-762.65

А.Я. Розин, д-р техн. наук (Центр технологии судостроения и судоремонта, Санкт-Петербург),
П.С. Вакулов, канд. техн. наук (НПП "Компенсатор", Санкт-Петербург)
E-mail: inbox@sstc.spb.ru

Размерный анализ собираемости и монтажа конструктивно и технологически усовершенствованных сдвигоповоротных сильфонных компенсаторов

Приведены описание и принцип действия вновь предложенного сдвигоповоротного компенсатора и указаны его технологические достоинства. Даны основные принципы проведения размерного анализа. Описана методика проведения собираемости и монтажа конструктивно и технологически усовершенствованного сильфонного сдвигоповоротного компенсатора. Приведены результаты выполненного размерного анализа.

The description and principle of operation of the newly proposed by shift-rotary compensator and indicated its technological sophistication are given. The main principles of conducting dimensional analysis are given. The technique of carrying out assemblage and installation of structurally and technologically advanced bellows shift-rotary compensator is described. Results of the made dimensional analysis are given.

Ключевые слова: упругий стержень, строительная длина, гофрированный сильфон, конусность, овальность, зазор, погрешность, среднеквадратичное отклонение, вероятностный закон, допуск, бухтиноватость, сборочная размерная цепь, замыкающее звено, взаимозаменяемость, случайное отклонение.

Keywords: elastic rod, construction length, corrugated bellows, taper, ovality, clearances, error, standard deviation; probabilistic law, tolerance, butenoate, assembly dimensional chain, closing link, interchangeability, random fluctuation.

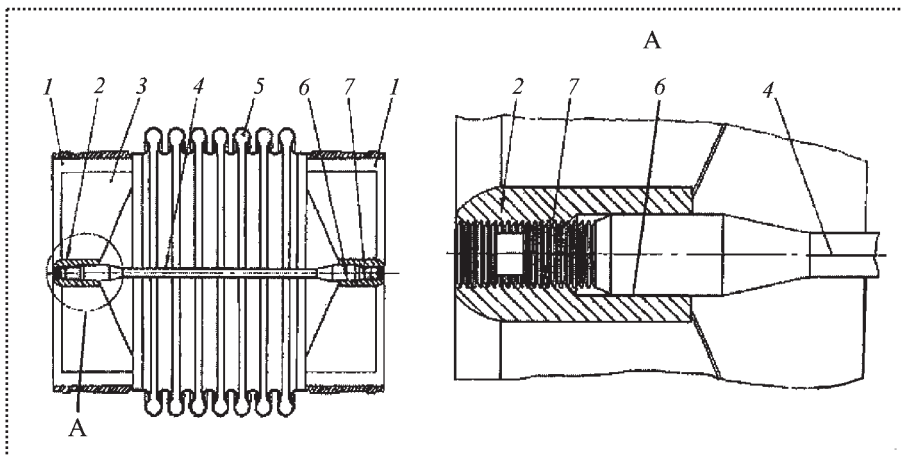
В отечественной промышленности используют сильфонные компенсаторы сдвигоповоротного типа, конструктивной особенностью которых является обеспечение параллельного сдвига и поворота их фланцев относительно друг друга в одной плоскости, что существенно снижает возможности технологического применения таких компенсаторов.

С целью устранения указанного недостатка сильфонных сдвигоповоротных компенсаторов осуществлено их конструктивно-технологическое совершенствование путем разработки и применения нового компенсатора, состоящего из гофрированного сильфона с концевыми патрубками, жестко связанными с радиальными ребрами втулками разгрузочного устройства. При этом само разгрузочное устройство представляет упругий стержень, расположенный внутри и по оси гофрированного сильфона, где этот стержень закреплен по концам в указанных втулках, имеющих цилиндрическую резьбу различного направления.

Новый сильфонный сдвигоповоротный компенсатор характеризуется возможностью его применения не только как средства гарантии безопасной эксплуатации трубопроводов, но также как элемента повышения эффективности монтажа этих трубопроводов. Последнее достигается за счет винтового крепления концов упругого стержня в его опорных втулках, позволяющего изменять строительную длину гофрированного сильфона. Наряду с этим за счет положения упругого стержня по оси гофрированного сильфона значительно увеличивается пространственная гибкость сдвигоповоротного компенсатора не в одной, а в нескольких плоскостях.

На рисунке представлен продольный разрез и фрагмент узла закрепления концов упругого стержня в опорных втулках концевых патрубков гофрированного сильфона нового сдвигоповоротного компенсатора.

С учетом указанных конструктивно-технологических преимуществ осуществлен размерный анализ собираемости и монтажа в составе изготавливаемых судовых трубопроводов сильфонных сдвигоповоротных компенсаторов.



Продольный разрез и фрагмент узла крепления концов упругого стержня:

1 – концевые патрубки; 2 – втулка; 3 – радиальное ребро; 4 – упругий стержень; 5 – сильфон; 6 – цилиндрическая часть конца упругого стержня; 7 – резьбовая часть конца упругого стержня

Сложность качественного формирования гофров сильфонов сдвигоповоротных компенсаторов явилась причиной необходимости сборки этих сильфонов из отдельных гофрированных обечаек. Практика свидетельствует, что процесс стыкования таких обечаек зачастую осложняется их конусностью, овальностью или макроволнистостью (бухтиноватостью) криволинейных поверхностей. В результате этого возникает разностенность, характеризующаяся погрешностью несовпадения стыкуемых кромок цилиндрических поверхностей. Эти погрешности независимы и случайны, однако они с достаточной точностью подчиняются закону нормального распределения.

В случае нормального распределения погрешностей зазоры между соединяемыми кромками можно рассматривать в виде разности между охватывающими и охватываемыми изделиями, представленными в общем виде как "отверстие и вал", среднеквадратичное отклонение размеров которых σ_3 выражается равенством:

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_{от}^2 + \sigma_в^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{от}$ и $\sigma_в$ – среднеквадратичные отклонения отверстия и вала.

При конусности (непараллельности) сопрягаемых поверхностей зазор ε между соединяемыми кромками равномерно изменяется по сопрягаемым поверхностям и его можно рассматривать как случайную величину с равномерным распределением. Размах равномерного распределения равен сумме

непараллельностей вида: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$. В зависимости от положения сопрягаемых поверхностей друг к другу размах непараллельности может меняться от $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ до $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$. При одинаковой непараллельности в одном направлении наклона $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$.

При искажении соединяемых кромок в виде овала возникает множество элементарных зазоров, среднеквадратичное отклонение которых σ_3 определяется выражением (1). С увеличением размеров сопрягаемых цилиндрических конструкций допуски на овальность и зазоры в их сопряжениях приходится увеличивать.

В случае овальности сопрягаемых цилиндрических поверхностей зазор будет состоять из двух случайных величин, одна из которых X_1 – зависит от погрешностей сопрягаемых размеров отверстия и вала, а вторая, X_2 – от их овальности.

Следует отметить, что как в случае конусности, так и в случае овальности практические значения предельных значений зазоров между кромками соединяемых конструкций могут быть выражены по правилу "трех сигм", согласно которому рассматриваемое отклонение соединяемых кромок соответствует вероятностному закону вида:

$$P(-3\sigma < X < 3\sigma) = 0,9973.$$

Поэтому поле допуска зазора $\delta_3 = 6\sigma_3$. В этом случае значение σ_3 может быть найдено через единицу допуска $i = 0,5\sqrt{d}$, где d – допуск.

Для каждого класса точности заданного размера отверстия или вала существует n_i единиц допуска,



т.е. $\delta_{от} = n_1 i$; $\delta_B = n_2 i$. Но, соответственно указанному ранее, $\delta_{от} = 6\sigma_{от}$ и $\delta_B = 6\sigma_B$. Отсюда:

$$\sigma_{от} = \frac{n_1 i}{6}; \quad (2)$$

$$\sigma_B = \frac{n_2 i}{6}. \quad (3)$$

Если выразить среднеквадратичное отклонение σ_3 по выражению (1) через единицу допуска i , то получим

$$\sigma_3 = \sqrt{\left(\frac{n_1 i}{6}\right)^2 + \left(\frac{n_2 i}{6}\right)^2} = \frac{1}{6} \sqrt{n_1^2 + n_2^2}. \quad (4)$$

В результате допуск на зазор, выраженный через единицу допуска, имеет значение, представленное выражением

$$\sigma_3 = i \sqrt{n_1^2 + n_2^2}. \quad (5)$$

Практика выполнения сборочных работ свидетельствует о том, что волнистость одной из соединяемых поверхностей заметно проявляет себя при сборке соединений цилиндрических и плоских поверхностей, образующих тавровые соединения. В этом случае формирование соединения осуществляют не способом выравнивания стыкуемых кромок в единую плоскость, как это надлежит осуществлять при сборке сильфона, а путем наведения кромки плоской поверхности на линию разметки, нанесенной на цилиндрическую поверхность, и подтягивания (поджатия) торца кромки плоской поверхности к цилиндрической поверхности. Таким образом, должны быть выполнены соединения концевых патрубков гофрированных сильфонов с радиальными ребрами разгрузочного устройства в виде упругого стержня.

Бухтиноватость (макроволнистость) поверхности также относится к случайным погрешностям, подчиняющимся закону нормального распределения. Поэтому волнистость может быть полностью характеризована среднеквадратичным значением $\sigma_{вл}$ и допуском на зазор $\sigma_{3,вл}$, значения которых могут быть определены на основе выражений, подобных формулам (4) и (5).

В результате установлено, что при практическом совпадении сопрягаемых поверхностей, допуск σ_Δ на монтажный зазор между соединяемыми кромками составляет 1,8 мм.

При наличии бухтиноватости волнистость поверхности цилиндрических концевых патрубков гофрированных сильфонов может привести к образованию монтажных зазоров, характеризующихся среднеквадратичным показателем волнистости, достигающим значения 0,83 мм. В результате этого дисперсия зазоров, вызванная волнистостью поверхности, составит $\sigma_B^2 = 0,83^2 = 0,689$ мм².

С учетом того, что на качество собираемости влияет волнистость поверхности только одного из соединяемых элементов, дисперсия зазоров $\sigma_B^2 = 0$. В результате среднеквадратичное отклонение зазоров составит

$$\sigma_3 = \sqrt{0,689 + 0} = 0,83 \approx 1 \text{ мм.}$$

Как уже указывалось, сильфонные сдвигоповоротные компенсаторы с конструктивно измененным разгрузочным устройством обладают технологической возможностью предварительного изменения их длины. Наряду с этим такие сильфонные компенсаторы легче деформируются при сдвиге и повороте.

Практика изготовления трубопроводов различного эксплуатационного назначения свидетельствует о том, что стыкуемые между собой заранее изготовленные и установленные на штатное место участки трубопроводов по положению их монтажных фланцев, как правило, отстоят не только по оси, но также имеют отклонение от этой оси. Объясняется это тем, что на точность пространственного совпадения трубопроводов влияет ряд факторов, однозначность оценки которых практически невозможна.

Увеличение гибкости сильфонных сдвигоповоротных компенсаторов позволяет осуществить их монтаж на штатном месте (при формировании различных трубопроводов) путем установки в промежутках между фланцами смежных труб, входящих по отдельности в состав двух смежных частей формируемого трубопровода.

С учетом указанного проведен размерно-технологический анализ монтажа сильфонного сдвигоповоротного компенсатора с конструктивно изменен-



ным разгрузочным устройством. Цель анализа — определение величины необходимых технологических перемещений сильфонного сдвигоповоротного компенсатора при его монтаже на штатном месте в составе формируемого судового трубопровода.

При выполнении анализа построены две сборочные размерные цепи. Замыкающим звеном первой цепи является технологически необходимое изменение длины сильфонного компенсатора $\Delta\Gamma$.

Замыкающим звеном второй цепи — технологически необходимый сдвиг с поворотом фланцев компенсатора — $\Delta\Delta$, вызванный пространственным отклонением фланцев смежных участков трубопроводов от заданного проектом.

Первая сборочная размерная цепь представлена следующим образом:

$$\Delta\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 - \Gamma_3 + \varphi_1 + \varphi_2, \quad (6)$$

где Γ_1 — промежуток между фланцами смежных труб по оси трубопровода, необходимый для монтажа сильфонного компенсатора на штатном месте;

Γ_2 — технологически необходимое изменение длины сильфонного сдвигоповоротного компенсатора;

Γ_3 — исходная длина используемого сильфонного сдвигоповоротного компенсатора;

φ_1 — непараллельность фланца сильфонного сдвигоповоротного компенсатора и фланца одной из смежных труб;

φ_2 — непараллельность другого фланца сильфонного сдвигоповоротного компенсатора и фланца второй смежной трубы.

Вторая сборочная размерная цепь представлена в виде:

$$\Delta\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \varepsilon_1 (\Delta_2 + \Delta_3) + \varepsilon_2 \Gamma_2,$$

где Δ_1 — расстояние между осями смежных труб в направлении, поперечном оси трубопровода в пределах промежутка, в котором должен располагаться сильфонный компенсатор;

Δ_2 — смещение оси одной из смежных труб по отношению к оси трубопровода;

Δ_3 — смещение оси второй смежной трубы по отношению к оси трубопровода;

ε_1 — непараллельность фланцев смежных труб по отношению друг к другу;

ε_2 — технологически необходимое поперечное смещение и поворота фланцев сильфонного сдвигоповоротного компенсатора, вызванных смещением осей смежных с компенсатором труб по отношению к оси трубопровода.

Согласно принципам полной взаимозаменяемости значения величин $\Delta\Gamma$ и $\Delta\Delta$ определены по следующим формулам:

$$\Delta\Gamma = \sum_{i=1}^{m=1} |\xi_{\Gamma_i}| \delta_{\Gamma_i} = \delta_{\Gamma_1} + \delta_{\Gamma_2} - \delta_{\Gamma_3}; \quad (7)$$

$$\Delta\Delta = \sum_{i=1}^{m=1} |\xi_{\Delta_i}| \delta_{\Delta_i} = \delta_{\Delta_1} + \delta_{\Delta_2} + \delta_{\Delta_3} + \delta_{\varepsilon_1} (\Delta_2 + \Delta_3) + \varepsilon_2 \Gamma_2. \quad (8)$$

Входящие в состав формул (7) и (8) составляющие вида δ , ε и Δ физически представляют случайные отклонения типа зазоров между соединяемыми поверхностями фланцев или отклонения от базовых линий из-за неточностей сборки, наличия деформаций после сварки, производственной корректировки трасс формируемых трубопроводов и т.д.

Как показывают результаты ранее проведенных исследований, разброс фактических значений указанных случайных величин подчиняется вероятностному правилу "трех сигм", ибо имеет нормальный закон распределения погрешностей.

Для определения необходимых значений $\Delta\Gamma$ и $\Delta\Delta$ в формулы (7) и (8) подставлены численные значения составляющих δ , ε и Δ , определенные путем информационного поиска и анализа данных ранее проведенных исследований. В результате получено следующее:

$$\Delta\Gamma = 400 + 30 - 370 + 1,2 + 1,2 = 62,4 \approx 63 \text{ мм};$$

$$\Delta\Delta = 4,4 + 2 + 2 + 0,8 (2+2) + 0,1 \cdot 370 = 44,6 \approx 45 \text{ мм}.$$

Сопоставление численных значений $\Delta\Gamma$ и $\Delta\Delta$ с геометрическими параметрами возможных модификаций сдвигоповоротных сильфонных компенсаторов



саторов с конструктивно измененным разгрузочным устройством показало, что для осуществления монтажа указанных компенсаторов их гофрированные сильфоны должны быть деформированы по длине на 8...10 % и изогнуты с поворотом соединительных фланцев на 6...7 %.

Результатами расчетов установлено, что при указанных ранее деформациях конструктивно измененного разгрузочного устройства значения возникающих в нем нормальных и касательных напряжений не превысят допустимых значений.

Согласно проведенному размерному анализу также установлено, что несмотря на наличие практически возможного искажения цилиндрических поверхностей и формы изделий, необходимых для изготовления гофрированных сильфонов, обеспечивается установленная нормативами величина сварочных зазоров, что является надежной гарантией выполнения сварочных швов надлежащего качества.

В результате указанного, возникающие при монтаже отклонения соединительных фланцев трубопроводов и устанавливаемых сдвигоповоротных компенсаторов, а также возможные несовпадения элементов с положением базовых плоскостей, не являются столь значительными, чтобы препятствовать практическому осуществлению технологии монтажа сдвигоповоротных компенсаторов путем изменения их строительной длины.

Библиографический список

1. Пат. 2293902 РФ. Компенсатор сдвигоповоротных перемещений / П.С. Вакулов, М.Г. Каравайченко, А.В. Остахов, Е.М. Предко, В.И. Анухин // Бюллетень патентов и полезных моделей. 2007. № 5.
2. Кудрявцев Ф.А. Обеспечение собираемости крупных сборочных единиц судового оборудования при проектировании и постройке судов модульно-агрегатным методом. СПб.: ЦНИ "Румб", 1979. 87 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

учебное пособие

А.А. Гусев, И.А. Гусева

2013 г. Объем 416 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-722-9 Цена 700 р.



Изложены теория и практика конструирования современных прогрессивных приспособлений для механосборочных производств. Подробно представлен метод автоматизированного проектирования приспособлений и рационального их конструирования. Показаны точностные и силовые расчеты.

Даны зависимости для проведения экономических расчетов при применении различных видов приспособлений.

Во 2-м издании (1-е вышло в 2007 г.) представлены зарекомендовавшие себя на практике методы проектирования и средства автоматизации для мелкосерийных производств, показана высокоэкономичная система технологической оснастки для автоматической серийной многономенклатурной сборки изделий.

Для студентов и аспирантов технических вузов. Может быть полезно инженерно-техническим работникам машиностроительных предприятий.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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

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

Выработка управляющих решений в условиях неполной информации

На верхнем уровне управления предприятием часто возникают ситуации, связанные с неизбежным риском, когда руководству приходится принимать управленческие решения в неопределенной обстановке. В таких случаях применяют методы исследования операций, из которых наиболее распространенным является метод, использующий теорию статистических решений. Эта теория служит для выработки рекомендаций по рациональному управлению при неполной информации, обусловленной объективными причинами.

Situations associated with the inherent risk, when management has to take management decisions in an uncertain environment, often occur on the upper level of the enterprise management. In such cases, operations research techniques are applied. The method using statistical decision theory is the most common method of them. This theory is used to make recommendations for the rational management of under incomplete information caused by objective reasons.

Ключевые слова: управляющее решение, неполная информация, метод исследования операций, теория статистических решений.

Keywords: management decision, incomplete information, operations research techniques, statistical decision theory.

На верхнем уровне управления предприятием (директор, главный инженер, главный технолог) часто возникают ситуации, связанные с неизбежным риском, когда руководству приходится принимать управленческие решения в неопределенной обстановке. К таким ситуациям относятся производственные задачи, решаемые в условиях неполной информации: разработка годового плана, плана реконструкции предприятия (производства), перехода на выпуск нового вида продукции. Обычно при этом нет полной ясности о степени и сроках обеспечения плана всеми необходимыми ресурса-

ми, о сроках ввода в действие объектов производства, эффективности новой техники в реальных условиях, о влиянии рыночных колебаний спроса и предложения на данный вид продукции.

В таких случаях применяют **методы исследования операций**, из которых наиболее распространенным является метод, использующий теорию статистических решений [1]. Эта теория служит для выработки рекомендаций по рациональному управлению при неполной информации, обусловленной объективными причинами.

В общем виде задача формулируется так: имеется m возможных решений (стратегий поведения) — P_1, P_2, \dots, P_m .

Об условиях обстановки (среды) можно сделать n предположений (стратегии природы) — O_1, O_2, \dots, O_n . Показателем эффективности того или иного решения является выигрыш a_{ij} , соответствующий паре $P_i - Q_j$ (например, прибыль). На основании значений a_{ij} находят наиболее выгодную стратегию P (линию поведения). Значения a_{ij} определяют методом экспертных оценок и сводят в табл. 1.

В теории статистических решений помимо показателя эффективности a_{ij} для оценки качества решения дополнительно используют показатель риска k_{ij} , показывающий, насколько полно реали-

Таблица 1

Эффективность решений для различных $P_i - Q_j$

P_i	a_{ij}			
	O_1	O_2	...	O_n
P_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
P_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
P_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}



Таблица 2

Эффективность решений для конкретного примера

P_1	a_{ij}		
	O_1	O_2	O_3
P_1	0,25	0,35	0,40
P_2	0,70	0,20	0,30
P_3	0,35	0,85	0,20
P_4	0,80	0,10	0,35

зуется наибольшая эффективность $P_i(Q_j)$ с учетом риска.

Показатель риска – это разность между эффективностью решения P при полной информации о ситуации O и эффективностью P при неопределенных данных об обстановке [1].

Рассмотрим пример использования теории статистических решений.

При переходе предприятия на новые виды продукции возможны четыре решения (P_1, P_2, P_3, P_4), которые зависят от соответствующей обстановки (O_1, O_2, O_3). Значения эффективности решений приведены в табл. 2.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что для обстановки O_1 эффективность решения P_1 минимальна ($a_{11} = 0,25$). Это соответствует отсутствию достоверных данных о ситуации O_1 . Наоборот, максимальное значение эффективности P_4 ($a_{41} = 0,80$) объясняется достаточно полной информацией о обстановке O_1 . В данном примере для $P_4(O_1)$ показатель риска будет нулевым, так как $k_{41} = 0,80 - 0,80 = 0$, а для $P_1(O_1)$ $k_{11} = a_{41} - a_{11} = 0,80 - 0,25 = 0,55$ (т.е. максимальный). Расчетные значения k_{ij} приведены в табл. 3.

Данные табл. 2 показывают, что эффективности $P_1(O_2)$ и $P_4(O_3)$ одинаковы ($a_{ij} = 0,35$). Однако из данных табл. 3 видно, что риск при этом отличается на порядок: $k_{12} = 0,5$, а $k_{43} = 0,05$.

Этот фактор заставляет более тщательно оценивать качество стратегий P_{ij} .

В зависимости от степени неопределенности обстановки различают три варианта решений [1–3].

Таблица 3

Расчетные значения показателей риска для конкретного примера

P_i	k_{ij}		
	O_1	O_2	O_3
P_1	0,55	0,50	0
P_2	0,10	0,65	0,10
P_3	0,45	0	0,20
P_4	0	0,75	0,05

Первый вариант – выбор решения, когда вероятности возможных вариантов обстановки известны. В этом случае в качестве оптимального выбирают решение, при котором среднее ожидаемое значение выигрыша $\max \bar{a}(P_i)$. Значение $\bar{a}(P_i)$ находят как сумму произведений вероятностей p_i различных вариантов обстановки на соответствующие значения выигрышей a_{ij} . Пусть для нашего примера вероятности знания обстановки равны: $p_1 = 0,5$; $p_2 = 0,3$; $p_3 = 0,2$. Значения $\bar{a}(P_i)$ определим, используя табл. 2:

$$\bar{a}(P_1) = 0,25 \cdot 0,5 + 0,35 \cdot 0,3 + 0,40 \cdot 0,2 = 0,31;$$

$$\bar{a}(P_2) = 0,70 \cdot 0,5 + 0,20 \cdot 0,3 + 0,30 \cdot 0,2 = 0,47;$$

$$\bar{a}(P_3) = 0,35 \cdot 0,5 + 0,85 \cdot 0,3 + 0,20 \cdot 0,2 = 0,47;$$

$$\bar{a}(P_4) = 0,80 \cdot 0,5 + 0,10 \cdot 0,3 + 0,35 \cdot 0,2 = 0,50.$$

Решение P_4 является оптимальным, так как $\max \bar{a}(P_4)$.

Отметим, что оптимальным может считаться также решение, при котором будет $\min \bar{a}(P_i)$, если a_{ij} представляет собой не выигрыш, а затраты предприятия.

Второй вариант – выбор решения, когда вероятности возможных вариантов обстановки неизвестны, но есть сведения об их относительных значениях. Если считать, что вероятности p_i примерно равны, то выбор решения можно осуществлять по методике первого варианта. В другом случае p_i могут быть установлены методом экспертных оценок.

Третий вариант – выбор решения, когда вероятности возможных вариантов обстановки абсо-



лютно неизвестны. В этом случае возможны три линии поведения при выборе решения.

В основе *первой линии поведения* лежит принцип "рассчитывай на худшее".

Оптимальным является решение, для которого выигрыш $a_{ij} = \max$ из минимальных при различных O_j . Из табл. 2 имеем: в строке $P_1 \min a_{11} = 0,25$; в строке $P_2 \min a_{22} = 0,2$; в строке $P_3 \min a_{33} = 0,2$; в строке $P_4 \min a_{42} = 0,1$. Следовательно, $P_1 = P_{\text{опт}}$, так как $a_{11} = 0,25 = \max$.

Вторая линия поведения позволяет избежать большого риска в любых условиях. Здесь оптимальным будет решение, при котором максимальный риск для различных O_j окажется минимальным. Из данных табл. 3 видно, что таким решением будет $P_3 = P_{\text{опт}}$, так как для него $k_{31} = 0,45 = \min$ (для $P_1 k_{11} = 0,55$; для $P_2 k_{22} = 0,65$; для $P_4 k_{42} = 0,75$).

В *третьей линии поведения* решение выбирают между расчетом на худшее и на лучшее. Оптимальным считают решение, при котором критерий "пессимизма–оптимизма" (критерий Гурвица) будет максимальным ($\max G$):

$$G = q \min a_{ij} + (1-q) \max a_{ij},$$

где весовой коэффициент $q = 0$ принимают в расчете на лучшее и $q = 1$ – в расчете на худшее.

Проведем расчет критерия G для нашего примера, приняв $q = 0,5$ (см. табл. 2)

$$G(P_1) = 0,5 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,4 = 0,32.$$

Для других решений: $G(P_2) = 0,45$; $G(P_3) = 0,52$; $G(P_4) = 0,45$.

Оптимальным является решение $P_3 = P_{\text{опт}}$, для которого $G(P_3) = 0,52 = \max$.

Значения критерия G и $P_{\text{опт}}$ для различных q нашего примера показаны в табл. 4.

Приведем пример, когда вероятности возможных вариантов обстановки известны (см. первый вариант выбора решения), но оптимальным считается решение, при котором среднее ожидаемое значение $M(P_i)$ будет не максимальным, а минимальным, так как $M(P_i)$ представляет собой не выигрыш, а затраты предприятия.

Такое условие характерно для задачи о замене технологического оборудования на предприятии. Назовем возможные ситуации (обстановки):

O_1 – оборудование работоспособно, но требует небольшого текущего ремонта;

Таблица 4

Значения критерия G и $P_{\text{опт}}$ при различных q

P_i	q				
	0	0,25	0,50	0,75	1,00
P_1	0,40	0,36	0,32	0,29	0,25
P_2	0,70	0,57	0,45	0,33	0,20
P_3	0,85	0,69	0,52	0,36	0,20
P_4	0,80	0,62	0,45	0,28	0,10
$P_{\text{опт}}$	P_3	P_3	P_3	P_3	P_1

O_2 – оборудование изношено и требует капитального ремонта;

O_3 – оборудование изношено полностью и требует замены.

Имеющийся опыт эксплуатации аналогичного оборудования показывает, что в 20 % случаев оборудование может находиться в состоянии O_1 , т.е. вероятность $p(O_1) = 0,2$; в 50 % случаев – в состоянии O_2 – $p(O_2) = 0,5$ и в 30 % случаев – в состоянии O_3 – $p(O_3) = 0,3$.

Для руководства предприятия возможны три варианта принятия решения:

P_1 – сохранить имеющееся оборудование еще на один год, произведя незначительный ремонт своими силами;

P_2 – провести капитальный ремонт силами специальной бригады;

P_3 – заменить все оборудование на новое, предусмотрев дополнительные затраты в бюджете предприятия.

Затраты, которые несет предприятие при различных решениях, представлены в табл. 5 (безразмерные величины). Математическое ожидание $M(P_i)$ (среднее ожидаемое значение) рассчитывают по формуле

$$M(P_i) = \sum_{i=1}^n L(\hat{I}_i, D_i) p(\hat{I}_i),$$

где $\sum_{i=1}^n L(I_i, D_i)$ – сумма затрат для различных решений.



Таблица 5

Затраты на различные проектные решения

O_i	$p(O_i)$	$L(O_i, P_j)$		
		P_1	P_2	P_3
O_1	0,2	1	3	5
O_2	0,5	5	2	4
O_3	0,3	7	6	3

Рассчитаем суммарные затраты для различных P_i :

$$\Sigma L(P_1) = 1 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,5 + 7 \cdot 0,3 = 4,8;$$

$$\Sigma L(P_2) = 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,5 + 6 \cdot 0,3 = 3,4;$$

$$\Sigma L(P_3) = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,5 + 3 \cdot 0,3 = 3,9.$$

Таким образом, оптимальным является решение $P_{\text{опт}} = P_2$, так как $\Sigma L(P_2) = \min$.

Ответственные решения, связанные с большим риском, чаще всего принимают коллегиально группой экспертов. В практике экспертных оценок существуют два пути принятия решения:

- стратегия простого большинства голосов после всестороннего обсуждения;
- стратегия суммирования рангов.

Второй путь покажем на примере.

Пусть решение принимает группа из трех экспертов (Θ) и возможны четыре альтернативных решения: P_1, P_2, P_3, P_4 . Вначале каждый эксперт проводит ранжирование решений в порядке предпочтения, затем составляют ранги решений (табл. 6).

Чем ниже ранг решения, тем оно предпочтительнее. Поэтому к реализации принимают то решение, у которого сумма рангов наименьшая. В нашем примере предпочтительным является решение P_3 , так как у него

$$\Sigma P_3 = 1 + 1 + 4 = 6 (\min).$$

У других решений ранг выше: $\Sigma P_1 = 4 + 3 + 1 = 8$; $\Sigma P_2 = 3 + 2 + 2 = 7$; $\Sigma P_4 = 2 + 4 + 3 = 9$.

Полной формализации задачи выработки оптимальных решений в автоматизированной системе

Таблица 6

Ранги решений по методу экспертных оценок

Θ	Ранг решения			
	1	2	3	4
Θ_1	P_3	P_4	P_2	P_1
Θ_2	P_3	P_2	P_1	P_4
Θ_3	P_1	P_2	P_4	P_3

управления (АСУ) пока не существует. Поэтому в настоящее время АСУ используют на верхнем уровне принятия решений как информационно-советующую систему, в базе данных которой содержится нормативно-справочная информация, данные об оборудовании, рабочей силе, ценах и спросе на продукцию, техническом уровне и др. Лицо верхнего уровня управления, используя всю имеющуюся информацию и подсказки АСУ по предпочтительным решениям, производит необходимые коррективы в управлении деятельностью предприятия [2, 3].

Вывод

В случаях, когда руководству предприятия приходится принимать управленческие решения в неопределенной обстановке, применяют методы исследования операций, из которых наиболее распространенным является метод, использующий теорию статистических решений. Эта теория служит для выработки рекомендаций по рациональному управлению при неполной информации, обусловленной объективными причинами.

Библиографический список

1. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1975. 333 с.
2. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М.: Форум, 2011. 224 с.
3. Иванов А.А., Москвичев А.А., Кварталов А.Р. Интегрированные производственные системы. Автоматизация информационных потоков: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ, 1997. 77 с.



УДК 621.825.54

М.П. Шишкарёв, д-р техн. наук,**А.Ю. Угленко** (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: zanozaspin@yandex.ru

Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием

Приведены результаты исследования нагрузочной способности и точности срабатывания двух вариантов адаптивной фрикционной муфты второго поколения с раздельным силовым замыканием фрикционных групп. Показано, что наилучшим сочетанием нагрузочной способности и точности срабатывания обладает второй вариант АФМ при определенном соотношении усилий замыкания пар трения фрикционных групп.

The results of the study load and precision actuation of two Adaptive friction clutches of the second generation with split friction force groups. Shows that the best combination of load response and the accuracy of the second variant has a specific ratio of circuit pairs of friction forces.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, нагрузочная способность, точность срабатывания, коэффициент усиления.

Keywords: adaptive friction clutch, load capacity, performance tolerance, the amplification factor.

В работах [1, 2] приведены результаты исследования двух вариантов адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения с раздельным силовым замыканием основной фрикционной группы (ОФГ) и дополнительной фрикционной группы (ДФГ). Исследование проводили отдельно для каждого варианта и его результаты не дают точного представления о преимуществах одного из вариантов по нагрузочной способности и точности срабатывания. Это затрудняет выбор варианта АФМ, обладающего в конкретных условиях эксплуатации лучшими эксплуатационными характеристиками, которые удовлетворяют требованиям использования предохранительных муфт в приводе машины.

Проведем сравнительный анализ нагрузочной способности и точности срабатывания первого и второго вариантов АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием.

Точность срабатывания обоих вариантов АФМ, если они имеют нагрузочную характеристику в форме кривой, возрастающей в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ (где f_{\min} , f_{\max} – соответственно минимальный и максимальный коэффициенты трения) исследуем с использованием ранее найденных в работах [1, 2] соотношений для вывода формул коэффициентов точности.

Для формы нагрузочной характеристики в виде кривой, монотонно возрастающей в интервале $f_{\min} \dots f_{\max}$, соотношения для определения значений коэффициента точности вариантов АФМ имеют следующий вид:

- для первого варианта:

$$K'_T = \frac{f_{\max} [z - (1 - n')(C' f_{\max} - 1)] [1 + (z - 1) C' f_{\min}]}{f_{\min} [z - (1 - n')(C' f_{\min} - 1)] [1 + (z - 1) C' f_{\max}]}, \quad (1)$$

- для второго варианта:

$$K'_T = \frac{f_{\max} [z - (1 - n'') + 1 - C'' f_{\max}] [1 + (z - 1) C'' f_{\min}]}{f_{\min} [z - (1 - n'') + 1 - C'' f_{\min}] [1 + (z - 1) C'' f_{\max}]}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) принято: z – число пар трения ОФГ; C' и C'' – коэффициенты усиления (КУ) для первого и второго вариантов АФМ; n' и n'' – коэффициенты для вариантов АФМ:

- для первого варианта:

$$n' = F'_n / F_n;$$

- для второго варианта:

$$n'' = F''_n / F_n,$$



где F'_n и F''_n – силы натяжения пружины, замыкающей пары трения ОФГ для первого и второго варианта АФМ;

F_n – сила натяжения пружины, замыкающей пару трения ДФГ для первого и второго варианта.

Остальные параметры (z, f_{\min}, f_{\max}) в сравниваемых вариантах АФМ одинаковы.

Ввиду того, что аналитическим способом сопоставить значения коэффициентов точности по соотношениям (1) и (2) не представляется возможным, воспользуемся графическим способом. В качестве аргументов указанных функций примем соответственно параметры n' и n'' .

Исходными данными для построения зависимостей являются: $f_{\max} = 0,8, f_{\min} = 0,1, z = 4$. При указанных данных можно воспользоваться значениями КУ, вычисленными по следующим соотношениям [1, 2]:

- для первого варианта:

$$C' \leq \frac{1}{(1-n')f_{\max}}; \quad (3)$$

- для второго варианта:

$$C'' \leq \frac{1+n''}{f_{\max}}. \quad (4)$$

Зависимости функций (1) и (2) показаны на рис. 1 (соответственно кривые 1 и 2). При построении кривой 2 принято соотношение, связы-

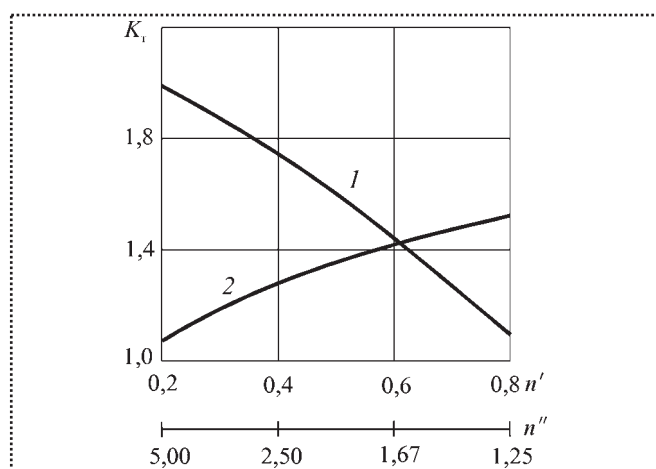


Рис. 1. Зависимости коэффициента точности K_1 АФМ от коэффициентов n' и n''

вающее между собой коэффициенты n' и n'' в виде $n'' = 1/n'$.

Анализ зависимостей показывает следующее:

- характер изменения точности срабатывания сравниваемых вариантов АФМ одинаковый. Точность срабатывания первого варианта АФМ возрастает с увеличением коэффициента n' , точность срабатывания второго варианта также увеличивается с ростом n'' ;

- при одинаковом соотношении между силами F'_{n1} и F_n , а также F''_{n1} и F_n , точность срабатывания второго варианта АФМ, в целом, выше, чем точность срабатывания первого варианта, кроме значений коэффициентов $n' = 0,8$ (кривая 1) и $n'' = 1,25$ (кривая 2).

Оценку эффекта повышения КУ будем производить согласно коэффициенту, вычисляемому по формуле:

$$K_{yy} = K_T C. \quad (5)$$

Коэффициент K_{yy} условно характеризует комплексную точность срабатывания АФМ и называется *коэффициентом эффективности УУ*.

По результатам вычислений, сделанных для построения зависимостей на рис. 1 по соотношениям (3) и (4) построены графики функции (3) в форме зависимости $K_{yy}(n)$, показанные на рис. 2. Кривая 1 отображает указанную зависимость для первого варианта АФМ, кривая 2 – для второго.

Анализ зависимостей показывает следующее:

- значение K_{yy} первого варианта АФМ снижается с уменьшением величины n'' (кривая 2);

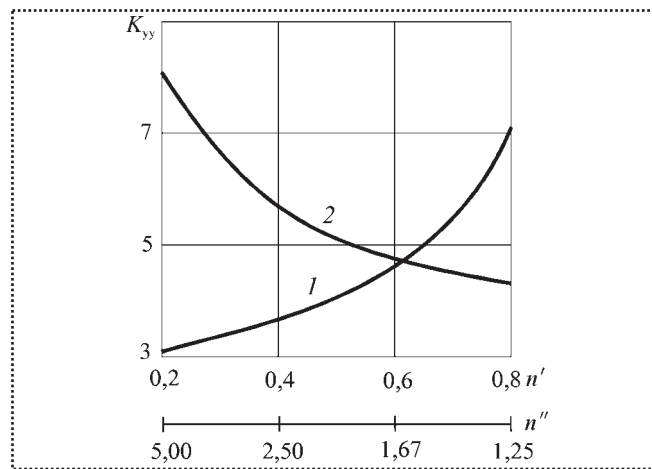


Рис. 2. Зависимости коэффициента эффективности УУ от коэффициентов n' и n''

• в обоих случаях при больших значениях КУ эффективность УУ снижается, при уменьшении КУ – повышается.

Одна из задач расчета и проектирования АФМ заключается в достижении высокой точности срабатывания при высокой номинальной нагрузочной способности. Высокая точность срабатывания достигается за счет увеличения КУ, что одновременно снижает нагрузочную способность муфт.

Следовательно, критерием высокой эффективности УУ обратной связи является минимизация K_{yy} . По данному критерию, согласно данным рис. 2, более эффективным является УУ первого варианта АФМ в интервале значений $n' = 0,20 \dots 0,63$. В остальной части интервала значений n более эффективно УУ обратной связи второго варианта АФМ.

Используя введенный показатель, оценим эффективность УУ обратной связи сравниваемых вариантов АФМ, если их нагрузочные характеристики представлены кривыми, имеющими максимум внутри интервала значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ при условии равенства друг другу значений вращающего момента, соответствующих приграничным значениям последнего.

Зависимости $K_{yy}(n)$ показаны на рис. 3. Кривая 1 отображает указанную зависимость для первого варианта АФМ, кривая 2 – для второго варианта.

Анализ кривых 1 и 2 показывает:

- при увеличении n' эффективность УУ первого варианта АФМ снижается (кривая 1);
- с уменьшением n'' эффективность УУ второго варианта АФМ повышается (кривая 2);
- в интервале значений $n' = 0,20 \dots 0,42$ и эквивалентных ему значений n'' эффективность УУ первого варианта АФМ выше, чем второго;
- в интервале $n' = 0,42 \dots 0,65$ эффективность УУ первого варианта АФМ ниже, чем второго.

Сравнение показывает более высокую эффективность УУ первого варианта АФМ.

Сопоставление значений K_{yy} , вычисленных для двух форм кривых нагрузочных характеристик АФМ по рис. 2 и 3 показывает, что более эффективно используется УУ АФМ с нагрузочной характеристикой в виде кривой, монотонно возрастающей в интервале $f_{\min} \dots f_{\max}$.

Данный вывод справедлив как для первого, так и для второго варианта АФМ (соответственно кривые 1 и 2 на рис. 2 и 3).

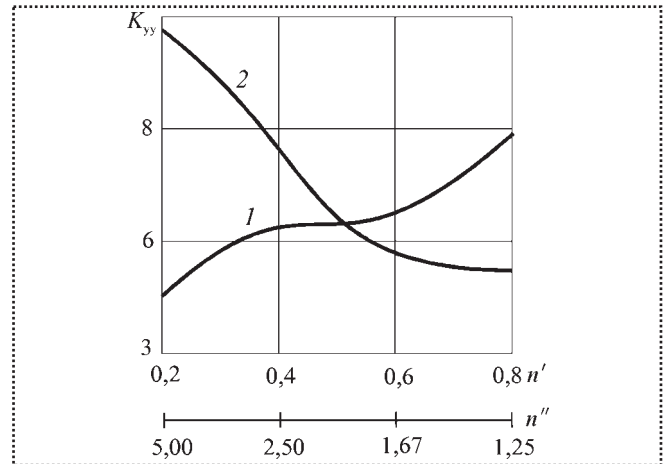


Рис. 3. Зависимости коэффициента эффективности УУ от коэффициентов n' и n''

Сравнение точности срабатывания вариантов АФМ показало преимущество одного или другого варианта в определенных интервалах значений n' и эквивалентного ему коэффициента n'' . Поскольку лучшим вариантом АФМ будет считаться вариант, сочетающий в себе наилучшее соотношение нагрузочной способности и точности срабатывания, представляет интерес определение указанного соотношения эксплуатационных характеристик вариантов АФМ и сопоставление последних по данному критерию.

Кроме того, представляет интерес соответствие характера изменения нагрузочной способности и точности срабатывания вариантов АФМ, в частности, в пределах тех интервалов изменения коэффициента n' и эквивалентного ему коэффициента n'' , внутри которых преимущество по точности срабатывания имеет тот или другой вариант АФМ.

При исследовании и сопоставлении вариантов АФМ воспользуемся графическим способом.

Кривые, показанные на рис. 4, построены по соотношениям:

$$T'_n = F_n R_{cp} f \frac{z - (1 - n')(C'f - 1)}{1 + (z - 1)C''f}, \quad (6)$$

$$T''_n = F_n R_{cp} f \frac{z(1 + n'') + 1 - C''f}{1 + (z - 1)C''f}, \quad (7)$$

где T'_n и T''_n – предельные вращающие моменты первого и второго вариантов АФМ;

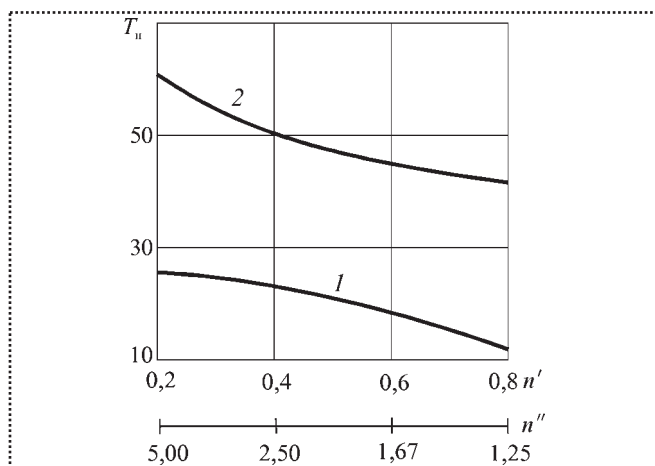


Рис. 4. Зависимости вращающего момента АФМ от коэффициентов n' и n''

F_n – сила натяжения пружины, замыкающей пары трения ДФГ как в первом, так и во втором варианте АФМ;

R_{cp} – средний радиус поверхностей трения ОФГ и ДФГ (принят одинаковым);

f – коэффициент трения между парами ОФГ и ДФГ;

z – число пар трения ОФГ.

Были использованы следующие исходные данные: $F_n = 800$ Н, $R_{cp} = 0,1$ м, $f = 0,1$, $z = 4$. Значения КУ, соответствующие выбранным значениям коэффициентов n' и n'' , вычислены соответственно по соотношениям (3) и (4).

Кривая 1 построена по соотношению (1), кривая 2 – по соотношению (2).

В данном случае рассматривается форма нагрузочной характеристики в виде кривой, **монотонно возрастающей** в интервале значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_{max}$.

Анализ графиков показывает следующее:

- номинальная нагрузочная способность обоих вариантов АФМ снижается при увеличении (для первого варианта) и при уменьшении (для второго варианта) величин n' и n'' ;

- наилучшее сочетание нагрузочной способности и точности срабатывания имеет место при максимальном значении n'' для второго варианта АФМ ($K_T'' = 1,07$, $T_n'' = 59,7$ Н·м – соответственно см. рис. 1, кривая 2, рис. 4, кривая 2);

- первый вариант АФМ не обладает выраженным показателем по наилучшему сочетанию точ-

ности срабатывания и нагрузочной способности (см. рис. 1, кривая 1 и рис. 4, кривая 1);

- наилучшим сочетанием нагрузочной способности и точности срабатывания второй вариант АФМ обладает при изменении n' и n'' в интервале 1,6...5,0 (кроме нижнего граничного значения);

- в интервале $n = 0,67 \dots 0,80$ (соответственно $n'' = 1,25 \dots 1,60$) второй вариант АФМ по-прежнему имеет преимущество по нагрузочной способности перед первым вариантом, однако уступает ему по точности срабатывания.

Иследуем сочетание нагрузочной способности и точности срабатывания вариантов АФМ для формы нагрузочной характеристики в виде кривой, **имеющей максимум внутри интервала** $f_{min} \dots f_{max}$, при равенстве друг другу вращающих моментов, соответствующих граничным значениям.

При исследовании воспользуемся графическим способом. Для построения кривых используем те же исходные данные, что и при построении на рис. 4.

Кривые зависимости $T_n(n)$ показаны на рис. 5. Кривая 1 отображает зависимость (1), кривая 2 – зависимость (2). Кривые построены по соотношениям (1) и (2).

Анализ зависимости показывает:

- сохранена, как и ранее, тенденция к снижению нагрузочной способности обоих вариантов АФМ при увеличении n' (для первого варианта) и при уменьшении n' и n'' (для второго варианта);

- второй вариант АФМ обладает большей нагрузочной способностью при более высокой точности срабатывания (см. рис. 4, кривая 2), что

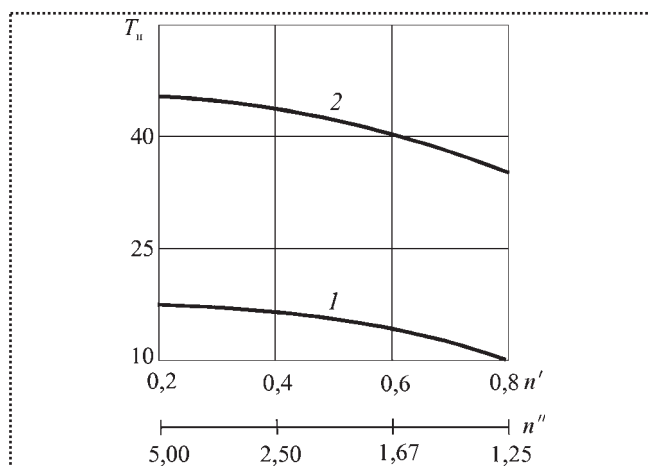


Рис. 5. Зависимости вращающего момента АФМ от коэффициентов n' и n''



имеет место практически при всех значениях n' и n'' . При $n' = 0,65$ ($n'' \approx 1,6$) точность срабатывания обоих вариантов АФМ практически одинакова (рис. 1, кривые 1 и 2), однако нагрузочная способность второго варианта значительно выше (см. рис. 5).

Таким образом, проведенное исследование показало в обоих случаях отсутствие выделяемых интервалов изменения величин n' и n'' , в которых наблюдалось бы качественное соответствие показателя точности срабатывания и нагрузочной способности сравниваемых вариантов АФМ.

Результаты исследования могут быть использованы при выборе варианта АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием, с учетом реальных условий их эксплуатации.

Выводы

1. Для оценки эффективности действия УУ обр-ратной связи введен коэффициент эффективности УУ, показывающий соотношение коэффициента точности и КУ.

2. Эффективность использования УУ в первом варианте АФМ снижается при увеличении коэффициента n' , а эффективность использования УУ второго варианта повышается при уменьшении коэффициента n'' .

3. При нагрузочной характеристике обоих вариантов АФМ в форме кривой, имеющей максимум внутри интервала значений коэффициента трения

$f_{\min} \dots f_{\max}$ и одинаковые значения на границах указанного интервала, эффективность действия УУ с увеличением коэффициента n' уменьшается (для первого варианта), а с уменьшением коэффициента n'' — повышается (для второго варианта).

4. С увеличением (для первого варианта) и с уменьшением (для второго варианта) соответственно коэффициентов n' и n'' уменьшается нагрузочная способность АФМ.

5. Наилучшее сочетание точности срабатывания и нагрузочной способности соответствует наибольшему значению коэффициента n'' для второго варианта АФМ.

6. Для нагрузочной характеристики в виде кривой, имеющей максимум внутри интервала значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$, при равенстве друг другу значений вращающих моментов, соответствующих граничным значениям коэффициента трения, второй вариант АФМ обладает большей нагрузочной способностью при более высокой точности срабатывания для большинства значений коэффициента n'' .

Библиографический список

1. Шишкарёв М.П., Лущик А.А. Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 3. С. 28–31.

2. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 10. С. 3–7.

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

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;
редакции журнала: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

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

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

Сдано в набор 11.06.14 г. Подписано в печать 11.08.14 г. Формат 60×88 1/8.

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

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

Отпечатано в ООО "Канцлер". 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.