ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

5 2015 **(178)**

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Антонец И.В. Разработка конструкций весоизмерительных устройств на основе упругих чувствительных элементов, работающих в условиях силовой компенсации внешних нагрузок 3

Маркина О.Н. Исследование особенностей использования галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе 6

Современные технологии сборки

Житников Ю.З., Паташов В.А. Автоматизированное завинчивание нескольких шпилек в отверстия узлов с малыми межцентровыми расстояниями 9

Технологическая оснастка для сборки

Жуков В.В., Степанов С.А. Универсальная камера для обработки маскированных поверхностей мелкодисперсным абразивным порошком 11

Миронова Е.А. Адаптивная затяжка групповых резьбовых соединений по моменту 17

Житников Б.Ю., Блинов С.В. Точность затяжки резьбовых соединений гайковертами на основе центробежных сил инерции 20

Сборка с использованием клеев

Холодкова А.Г. Сборка комбинированных клеевых соединений. 23

В помощь конструктору, технологу

Труханов В.М., Крыхтин Ю.И. Улучшение компоновки и условий эксплуатации четырехвального механизма передач и поворота с предварительным выбором передачи и дифференциальным механизмом поворота для легкой гусеничной машины 28

Разборка. Ремонт

Кадырметов А.М., Мальцев А.Ф., Смоленцев Е.В., Сухочев Г.А. Технологическое обеспечение восстановления изношенных деталей машин плазменным напылением и упрочнением 35

Разное

Руднева Л.Ю. Основные направления технологического прогнозирования . . . 39

Сорокин М.Н., Ануфриева К.С. Расширение множества центральных композиционных планов 41

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: (499) 269-54-98. Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

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

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ

А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА

В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТРАЖИНСКИЙ, д.т.н.

ПОЛЬША

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2015

THE MONTHLY
JOURNAL
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING
IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

5 2015 (178)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Antonec I.V. Development of the weightning devices design based on elastic sensing elements which working in condition of compensation of external loads 3

Markina O.N. Television measuring system JC halogen lamps features of use research 6

Modern technologies in assembly

Zhitnikov Yu.Z., Patashov V.A. The automated screwing up of several hairpins in apertures knots with small distances between their centres . . . 9

Technological equipment for assembly

Zhukov V.V., Stepanov S.A. Multipurpose cabin for masked surfaces processing of fine abrasive material 11

Mironova E.A Adaptive tie-bar of the group theaded connection by moment 17

Zhitnikov B.Yu., Blinov S.V. Accuracy fastener tightening wrenches on the basis of centrifugal forces of inertia 20

Assembly with use glue

Kholodkova A.G. Assembling composite adhesive joints 23

Industrial and design engineer's aid

Trukhanov V.M., Krikhtin Yu.I. Improvement of composition and operation conditions of fourshafted gear and slewing mechanism with preliminary choice of transmission and differential slewing mechanism for light tracked vehicle 28

The dismantling. Repair

Kadyrmetov A.M., Maltzev A.F., Smolentzev E.V., Suhochev G.A. Technological providing of retailoring of wear out machine details by plasma-spraying and strengthening 35

Different

Rudneva L.Yu. Fundamental direction of technology prognoses 39

Sorokin M.N., Anufrieva K.S. Expansion of a set of the central composite plans . . 41

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 269-54-98. Fax: (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
B.A. YAKIMOVICH
V.G. OSETROV
KAZAN
R.I. ADGAMOV
KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV
KOLOMNA
Yu.D. AMIROV
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV
NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OMSK
V.N. KOSTIUKOV
OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
RYBINSK
V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
V.A. NIKOLAEV
ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA
TOLIATI
A.I. RYZHKOV
TULA
A.I. PREYS
KHABAROVSK
V.A. LASHKO

Ukraine

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

Belarus

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

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

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

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

УДК 624.869.72-5

И.В. Антонец, *д-р техн. наук (Ульяновский государственный технический университет)*
E-mail: iv.antonec@yandex.ru

Разработка конструкций весоизмерительных устройств на основе упругих чувствительных элементов, работающих в условиях силовой компенсации внешних нагрузок

Приведена оригинальная конструкция весоизмерительного устройства, использующего систему силовой компенсации внешней нагрузки, проведены эксперименты, подтвердившие ее работоспособность. Практическое отсутствие деформации упругого элемента разработанного весоизмерительного устройства позволит избавиться от целого ряда погрешностей и повысить точность процесса взвешивания.

Yiu find an original construction of a weight measuring device, making system of force compensation of external load. The tests have corroborated its efficiency. Practical lack of deformation of elastic element allows to get rid of the quite a number of errors and raise exactness of the process of measuring.

Ключевые слова: упругий элемент, кольцевой элемент, чувствительный элемент, деформация упругого элемента, статические характеристики, весоизмерительные устройства.

Keywords: elastic element, ring element, sensitive element, deformation of the elastic element, static characteristics, weighting devices.

Устройства, в которых используются автоматические весоизмерители, достаточно широко распространены: лифты, краны-штабелеры, лебедки, дозаторы и др. Низкая эксплуатационная надежность известных весоизмерительных устройств, работающих в автоматическом режиме, объясняется в основном высокой инерционностью измерительных механизмов и относительной сложностью их конструкции. Создание весоизмерительных [2, 3] устройств на основе кольцевого упругого элемента (УЭ) и вторичного преобразователя деформации в электрический сигнал является перспективным направлением, с учетом наилучшего сочетания конструктивных коэффициентов кольцевого УЭ: чувствительности, быстродействия и приведенной массы.

Упругие и прочностные свойства материала УЭ должны быть не только достаточно высокими, но также и постоянными во времени. С этой точки зрения качество упругого чувствительного элемента (УЧЭ), его параметрическая надежность в первую очередь зависят от неупругих эффектов материала, которые проявляются в виде гистерезиса, релаксации, ползучести и т.п. Именно эти погрешности, являясь причиной нестабильности показаний прибора во времени, часто ограничивают его точность.

Точные измерения показывают [1], что даже при напряжениях, меньших предела упругости, реальные материалы не имеют той строго линейной и однозначной зависимости между напряжениями и деформациями, которая выражается законом Гука. Зависимости нагружения и разгрузки материала в пределах упругих деформаций в действительности не совпадают, образуя петлю гистерезиса.

Рабочие свойства УЭ могут быть нарушены во времени вследствие ползучести материала, которая протекает особенно интенсивно при больших напряжениях и высоких температурах. Такая интенсивная ползучесть, когда существенно нарастают пластические необратимые деформации, конечно, совершенно недопустима для любого УЭ. Однако ползучесть может возникать и при напряжениях, меньших предела упругости в условиях нормальных или слегка повышенных температур. Ползучесть УЭ в этом случае может быть обнаружена только при достаточно точных измерениях. Такая "микроползучесть" существенна только для УЧЭ измерительных приборов высоких классов точности, так как может нарушить их метрологические функции. Накопление в результате процесса ползучести необра-

тимых деформаций, изменение вследствие этого геометрии элемента приводят к появлению остаточного прогиба и отклонению упругой характеристики от первоначальной.

Ползучесть материала УЭ [1] может проявляться и в форме релаксации напряжений. Если в испытуемом образце создать некоторую деформацию и оставить ее неизменной во времени, то оказывается, что в результате пластического течения напряжения будут уменьшаться. Это связанно с тем, что пластическая деформация с течением времени нарастает. Так как полная деформация, состоящая из упругой и пластической, постоянна, то увеличение пластической деформации приводит к уменьшению упругой деформации, соответственно и напряжения в материале образца также уменьшаются.

Практически реализуемым условием [4] сохранения метрологических функций УЧЭ измерительных приборов высоких классов точности является минимизация деформации УЭ.

Разработана конструкция весоизмерительного устройства, в которой использована система стабилизации пространственного положения упругого кольца, т.е. в процессе работы деформация кольца определяется лишь значением динамической погрешности системы. Схема указанной конструкции приведена на рис. 1.

Работа устройства осуществляется при помощи измерительного кольцевого УЭ *1*, который при приложении внешней нагрузки деформируется, образуя зазор между шторками *3*. Таким образом, световой поток от источника излучения *10*, который будет приниматься приемником излучения *7*, прямо пропорционален нагрузке. Приемник излучения преобразует световой поток в электрический ток.

Вырабатываемый приемником излучения электрический ток через усилительное устройство *6* поступает на катушку *5* электромагнита, ферромагнитный стержень *4* которого вместе с катушкой прикреплены к технологическому приливу *2* УЭ. При протекании тока по катушке в ферромагнитном стержне возникает магнитный поток, пропорциональный току, который взаимодействует с ферромагнитным ярмом *9*, прикрепленным к технологическому приливу *8*. В процессе взаимодействия магнитного поля, протекающего по ферромагнитному стержню, с ярмом, последний будет с определенным усилием притягиваться, и в результате приливы *2* и *8* будут сближаться, сводя к практически нулевому значению зазор между закрепленными на приливах шторками *3*. Таким образом, чем больше нагрузка, приложенная к упругому элементу, тем больше сила притяжения его приливов, т.е. упругое кольцо практически не деформируется. Результат измерения внешней нагрузки выражается значением протекающего по катушке тока.

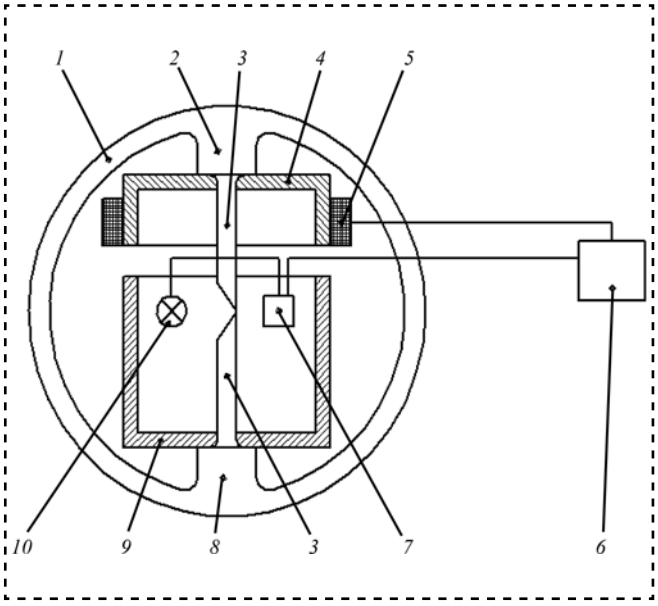


Рис. 1. Весоизмерительное устройство, использующее систему стабилизации пространственного положения упругого кольца

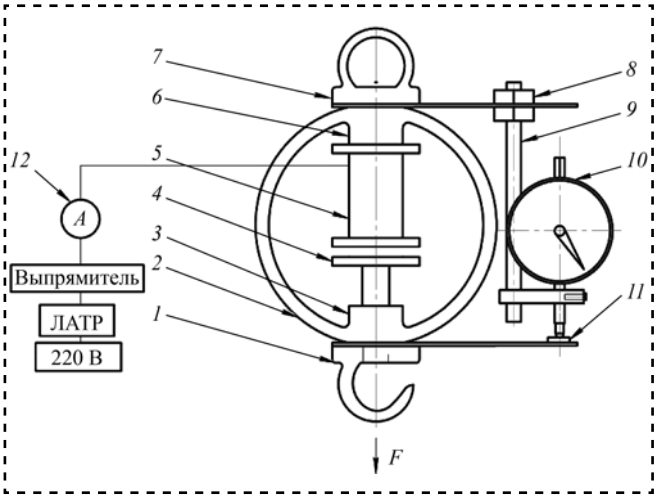
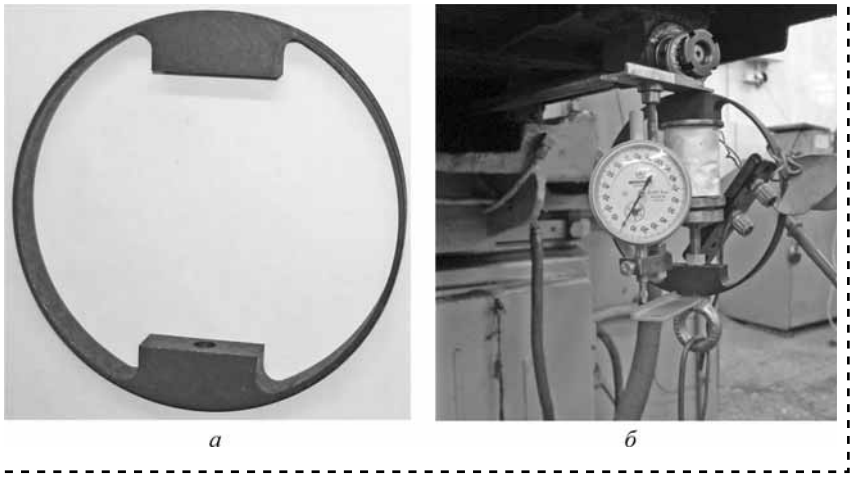


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования кольцевых УЧЭ:

1 — рым-гайка; *2* — исследуемый УЧЭ; *3* — нижний прилив; *4* — якорь; *5* — электромагнит; *6* — верхний прилив; *7* — крюк рым-гайки; *8* — гайка; *9* — приспособления для фиксации индикатора; *10* — индикатор часового типа; *11* — кронштейн с пластиной; *12* — амперметр



а *б*

Рис. 3. Объекты исследования:
а — кольцевой УЧЭ; *б* — стенд для исследования кольцевого УЧЭ с системой силовой компенсации внешней нагрузки

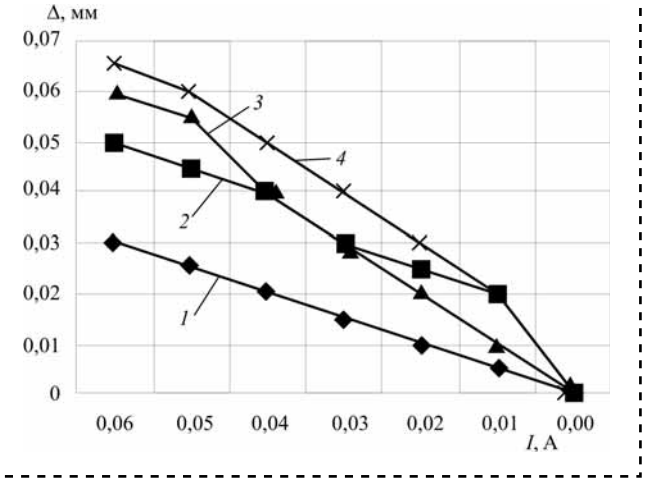


Рис. 4. Зависимости деформации Δ УЭ от тока компенсации *I* при внешней нагрузке Н:
1 — 4,9; *2* — 7,4; *3* — 9,8; *4* — 12,2

Экспериментальное исследование весоизмерительного устройства, использующего электромагнит для компенсации внешних нагрузок, проводилось следующим образом (рис. 2).

Верхний прилив *6* УЧЭ был жестко закреплен на раме стенда (рис. 3), при этом стрелка индикатора часового типа была выведена на ноль. Потом на нижний прилив *3* (см. рис. 2) через рым-гайку *1* с крюком *7* был подвешен груз, действие которого привело к расхождению его приливов, а следовательно, якоря *4* и основания электромагнита *5*. Указанное расхождение фиксируется индикатором часового типа *10*. Далее на электромагнит *5* через реостат подавался электрический ток, а возникающее при этом в катушке электромагнитное поле начинало притягивать якорь, компенсируя расхождение приливов. Индикатор часового типа *10* позволяет фиксировать момент перемещения упругого элемента в исходное положение. Значение внешней нагрузки в этой системе определяется силой тока, необходимой электромагниту для компенсации полученной деформации. Значения силы тока измеряли с помощью амперметра.

Результаты эксперимента по исследованию значений тока компенсации деформации УЧЭ, в зависимости от внешней нагрузки весоизмерительного устройства представлены на рис. 4. Графики результатов экспериментов построены по медианам выборок.

Полученные экспериментально графические зависимости подтверждают работоспособность системы компенсации деформации упругого кольца (за счет использования электромагнитного поля катушки, взаимодействующего с якорем), т.е. деформация кольцевого УЧЭ может быть сведена к нулю.

Таким образом, практическое отсутствие деформации УЭ разработанного весоизмерительного устройства позволит избавиться от целого ряда погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств материала с течением времени и т.п. Устранение перечисленных погрешностей позволит повысить точность процесса взвешивания.

Библиографический список

1. **Феликсон Е.И.** Упругие элементы силоизмерительных приборов. М.: Машиностроение, 1977. 160 с.

2. **Антонец И.В., Табаков В.П.** Разработка и исследование весоизмерительного устройства на основе упругого кольца и встроенного в него струнного датчика // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер.: Технологические науки. 2008. № 3. С. 124—128.

3. **Антонец И.В., Горшков Г.М., Петров В.А., Терешенок А.П.** Весоизмерительное устройство // Положительное решение по заявке на патент № 2013131899 от 11.12.14.

4. **Антонец И.В., Петров В.А., Терешенок А.П.** Устройства для компенсации остаточных деформаций упругого чувствительного элемента весоизмерительных устройств // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 9. С. 45—48.

УДК 620.1-1/-9

О.Н. Маркина *(Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт")*
E-mail: o.n.markina@gmail.com

Исследование особенностей использования галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе

Исследованы особенности использования галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе, что построена на базе микроскопа "Биолам Л211". Из временной зависимости светового потока галогенной лампы JC, полученной экспериментально, установлено, что от момента включения лампы должно пройти 0,2 ч (12 мин) до начала измерений телевизионной системой. Экспериментально исследовано, что световой поток и коррелированная цветовая температура галогенной лампы JC через час после включения изменяются на незначительную величину, а именно на 2,92 % и 0,7 % соответственно. Даны практические рекомендации по продлению срока службы галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе.

The paper is devoted to research of JC halogen lamps features of use in television measuring system that is based on the Biolam L211 microscope. The time dependence of the light flux of the halogen lamp was obtained experimentally. We established that before starting the measurements with television system from switching the lamp on must pass up to 0,2 hours (12 min). Experimentally studied that luminous flux and correlated color temperature of the JC halogen lamp in an hour after switching on change by insignificant value that is 2,92 and 0,7 %, respectively. Practical recommendations for extending the life of JC halogen lamps in the television measurement system were given.

Ключевые слова: освещение, галогенная лампа JC, светотехнические характеристики, телевизионная измерительная система.

Keywords: lighting, JC halogen lamp, lighting characteristics, television measuring system.

Введение

Известно, что проблеме освещения в микроскопии уделяется большое внимание ученых. Так, в работе [1] разработан светодиодный осветитель для оптического микроскопа с целью формирования 3D-изображения. В статье [2] описаны преимущества использования специальных телецентрических источников освещения, которые используются для повышения точности измерения размытых краев микронных объектов исследования. В настоящее время наиболее распространенный источник освещения — галогенные лампы. Для калибровки прецизионных фотоэлектрических приборов по яркости используют ленточные светоизмерительные лампы, которые имеют тело накала в виде прямоугольника [3]. Однако такие лампы накаливания имеют недостатки: неравномерность распределения яркости по телу лампы, изменение распределения яркости во время эксплуатации. Это затрудняет их применение для калибровки. Известны исследования Маркова по волоконно-оптическому осветителю, который рекомендуется использовать в микроскопии для освещения [4]. Но данный осветитель серийно не выпускается.

В работе [3] предложено для обеспечения равномерности освещения использовать галогенную лампу с молочным распределителем. Такое решение авторы связывают с тем, что нить накаливания имеет определенные геометрические неравномерности, а молочное стекло в этом случае является перераспределителем. Проведенные авторами метрологические исследования показали возможность применения этого научно-технического решения.

Цель данной работы — исследование особенностей и пространственное распределение светотехнических характеристик галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе (ТИС) микроскопа.

Исследование осветительной системы оптического микроскопа с галогенной лампой JC

Телевизионная измерительная система (ТИС) была построена на базе оптического микроскопа "Биолам Л 211", со встроенной осветительной системой на базе галогенной лампы JC. Как известно, на качество изображения

объектов исследования влияют: неравномерность рассеяния светового потока источника освещения, стабильность источника освещения, несоответствие характеристик источника освещения заявленным в техническом паспорте и др.

Экспериментальные исследования галогенной лампы JC проводили на специализированном оборудовании: высокоточном матричном спектрорадиометре HAAS-2000 (Китай); приборе комбинированный "ТКА-ПКА" (09), в состав которого входят люксометр, пульсметр, яркомер; гониофотометр для светильников и ламп GO-2000; приемник излучения V-11001. Исследования показали, что заявленные в техническом паспорте характеристики галогенной лампы JC не соответствуют измеренным (см. таблицу).

Сравнение характеристик галогенной лампы JC

Характеристика	Значения	
	экспериментальные	по техническому паспорту
Активная мощность потребления P, Вт	45,5	50,5
Световой поток F, лм	435,6	950,0
Световая отдача E_v, лм/Вт	9,6	—
Коррелированная цветовая температура ССТ, К	2815	3000
Индекс цветопередачи R_a	99,9	—
Коэффициент пульсаций освещенности $K_п$, %	1,0	—

Анализируя сравнительные результаты можно сделать вывод, что конкретные характеристики галогенной лампы JC не всегда соответствуют паспортным.

Было проведено исследование равномерности светового потока с момента включения ТИС. В ходе исследований получили временную зависимость светового потока (рис. 1) при рабочем напряжении $U = 12$ В, $f = 50$ Гц.

Анализируя экспериментальную зависимость светового потока, можно заключить, что в начальный период работы (с момента включения до 0,2 ч) галогенная лампа JC не дает максимальный световой поток, излучение нестабильно. В этот период происходит разогрев стеклянной колбы и стабилизация термодинамического равновесия паров галогенида. Поэтому проводить измерения геометрических размеров на ТИС можно по истечении 0,2 ч после момента включения для обеспечения стабильного режима системы освещения.

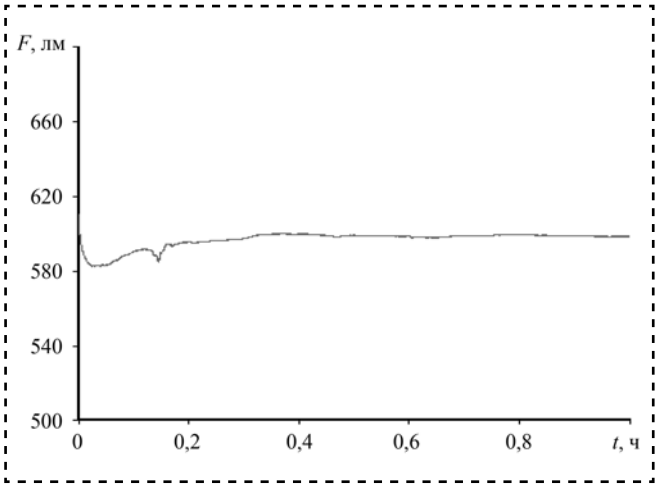


Рис. 1. Временная зависимость светового потока галогенной лампы JC

Экспериментальные исследования показали, что световой поток и коррелированная цветовая температура лампы через 1 ч после включения меняются незначительно, а именно на 2,92 и 0,7 % соответственно.

В стабильном рабочем состоянии (через час после включения) галогенная лампа JC имеет следующие технические характеристики ($U = 12$ В, $f = 50$ Гц):

Коррелированная цветовая температура ССТ, К 2815
Индекс цветопередачи R_a 99,9
Координаты цветности x, y 0,451, 0,409
Координаты цветности u', v' 0,258, 0,525
Стандартное отклонение в уравнивания цветов (SDCM, 2700 K) 4,2
Пиковая длина волны L_p, нм 780,0
Полуширина пика излучения L_{HP}, нм 187,3

На основе проведенных экспериментов по исследованию равномерности силы света излучения вольфрамовой спирали накаливания галогенной лампы JC в стабильном режиме была построена 3D-модель пространственного распределения (рис. 2), которая позволяет сделать вывод о телесном угле излучения (0...360°) в плоскостях C_{0-90}, C_{90-180}, $C_{180-270}$, C_{270-0}.

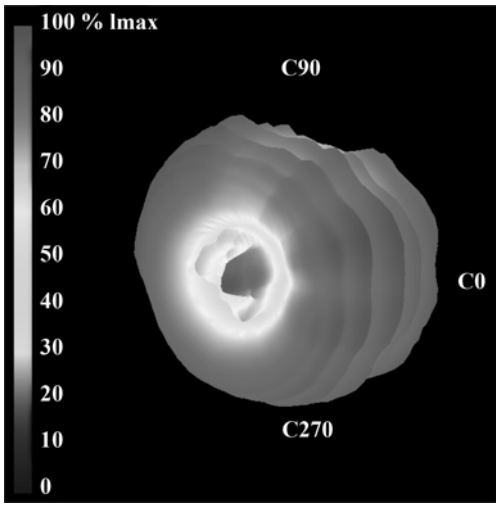


Рис. 2. 3D-модель пространственного распределения силы света галогенной лампы JC

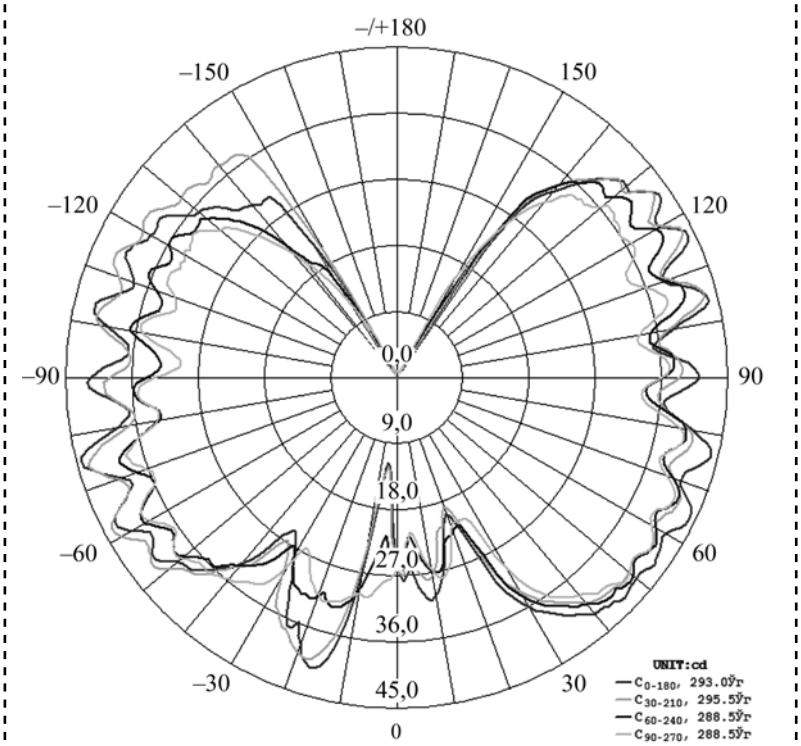


Рис. 3. Кривые силы света в четырех плоскостях $C_{0—180}$, $C_{30—210}$, $C_{60—240}$, $C_{90—270}$ галогенной лампы JC

Исследование показало, что телесный угол излучения галогенной лампы JC составляет 360°, в области телесного угла C_{90} наблюдается понижение интенсивности распределения силы света, а распределение излучения в плоскостях $C_{180—270}$, $C_{270—0}$ равномерное.

Для того чтобы определить количественно, на сколько отличается распределение излучения в плоскости C_{90} от других плоскостей телесных углов, были построены кривые силы света галогенной лампы JC (рис. 3).

В плоскости C_{90} распределение излучения изменяется в синем спектре света от 27 до 31 у.е., в красном и зеленом спектре света — от 15 до 45 у.е. При других плоскостях C_0, C_{180}, C_{270} распределение излучения лампы JC изменяется в красном и зеленом спектре света от 40 до 45 у.е. в синем спектре света — от 30 до 40 у.е. Таким образом, при измерениях необходимо галогенную лампу JC в системе освещения микроскопа ставить в пространственное положение, соответствующее максимальной силе света (в соответствии с результатами рис. 3).

Дополнительные исследования показали, что уменьшение рабочего напряжения вдвое — до 6 В, сразу после первого включения и перед последним выключением позволяют увеличить срок службы галогенной лампы JC в 1,5—2 раза.

Библиографический список

1. **Lei Tian, Laura Waller** 3D intensity and phase imaging from light field measurements in an LED array microscope // Optica. 2015. Vol. 2. No. 2. P. 104—111.

2. **Telecentric** illumination // Edmund optics Europe, optics and optical instruments annual catalog. 2015. P. 390.

3. **Михеенко Л.А., Боровицкий В.Н.** Вторичные эталоны яркости на базе галогенной лампы с рассеивателем // Метрология и стандартизация. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 3 С. 61—64.

4. **Пат. РФ № 2002122949/28**, 27.08.2002. Волоконно-оптический осветитель / В.Н. Марков. Опубл. 20.01.2005. Бюл. № 2.

УДК 621.757

Ю.З. Житников, *д-р техн. наук,* **В.А. Паташов**
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: zhitnikovy@mail.ru

Автоматизированное завинчивание нескольких шпилек в отверстия узлов с малыми межцентровыми расстояниями

Предложено конструктивное решение задачи автоматизированного завинчивания нескольких шпилек в отверстия узлов с малыми межцентровыми расстояниями.

The constructive decision a problem of the automated screwing up several hairpins in apertures of knots with small distances between their centres is offered.

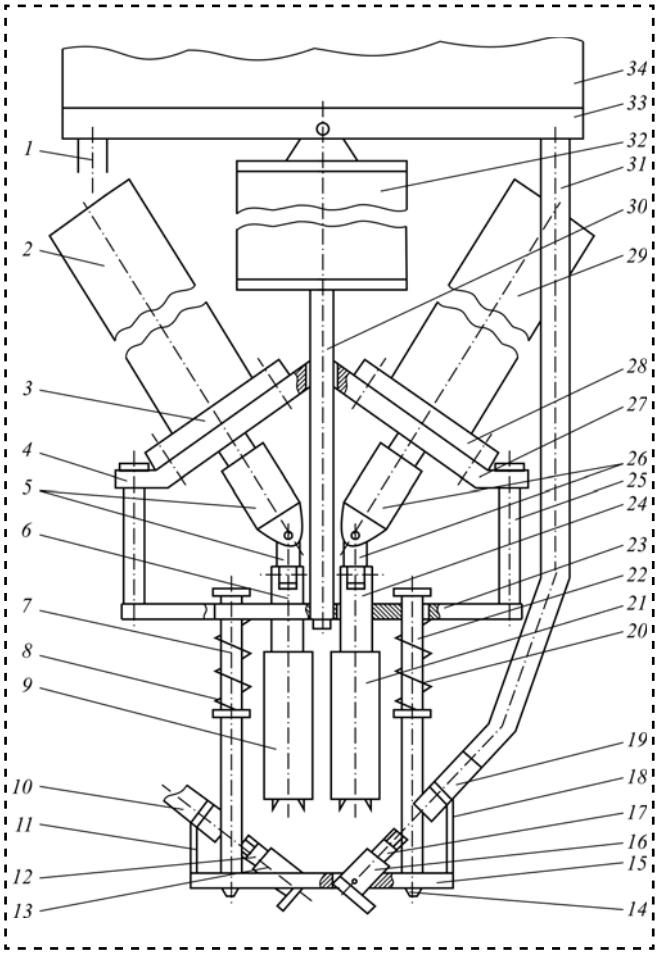
Ключевые слова: автоматизация, завинчивание шпильки, межцентровое расстояние.

Keywords: automation, hairpin screwing up, distance between the centres of axes.

При поузловой сборке машин и механизмов часто встречаются случаи, когда необходимо завинчивать несколько шпилек, причем межцентровые расстояния между осями резьбовых отверстий малы. Считалось, что автоматизировать процесс сборки при помощи многошпиндельных завинчивающих устройств, созданных на базе автономных шпильковертов, невозможно, так как набор одношпиндельных шпильковертов по диаметральным размерам не вписывался в отведенное пространство. Сборку осуществляли механизированно при помощи ручных одношпиндельных завинчивающих устройств. С учетом подачи собираемого узла на позицию сборки, ручного наживления двух шпилек, их завинчивание и удаление узла с позиции сборки затрачивается не менее 40 с. На каждую дополнительную шпильку затраты времени возрастают в среднем на 15 с.

Следует учесть, что частота вращения шпинделя шпильковерта не должна превышать 70 мин$^{-1}$, так как в момент торможения (затяжки) возникает момент сил инерции, направленный в сторону вращения, что может привести к срезу резьбы либо в резьбовом отверстии, либо резьбы шпильки, захватываемой разрезными резьбовыми кулачками патрона, а это приводит к появлению брака.

Предлагаем конструктивное решение поставленной задачи для завинчивания двух шпилек. Конструктивное взаимодействие элементов сборочного устройства представлено на рисунке.



Конструктивное взаимодействие элементов сборочного устройства

Устройство состоит из рамы, условно представленной плитой *33*, питателя магазинного типа *34* [5], пневмоцилиндра *32*, шарнирно закрепленного к плите *33*. Шток *30* поршня пневмоцилиндра проходит через плиту *23*, на которой закреплены шпильковерты *2* и *29*, и жестко крепится к плите *23*. Плиты *27* и *23* жестко скреплены между собой штангами *4* и *25*. Плита *23* связана с кондукторной плитой *15* двумя поджатыми пружинами *8* и *20*, направляющими *7* и *22*, которые через плиту *23* проходят с зазорами. На кондукторной плите *15* шарнирно закреплены неуравновешенные втулки *13* и *16*, в которые из питателя *34* по пружинным лоткам *1* и *31*, оканчивающихся наконечниками *10* и *19*, подаются шпильки *12* и *17*, удерживаясь от выпадения за счет упора в отверстиях кондукторной плиты.

На шпиндели шпильковертов напрессованы втулки карданных валов *5* и *26*, вторые концы которых шарнирно соединены с осями *6* и *24*, проходящими с зазором через плиту *23*. На осях *6* и *24* расположены патроны *9* и *21* с разрезными резьбовыми кулачками для удержания шпилек в процессе завинчивания. Строго ориентированные по осям с неуравновешенными втулками *13* и *16* наконечники *10* и *19* удерживаются стойками с хомутами *11* и *18*. Кондукторная плита *15* снабжена двумя усеченными штифтами *14* для предварительной доориентации кондукторной плиты и узла (условно не показан). В кондукторную плиту запрессованы две направляющие штанги (условно не показаны), которые с зазором проходят через плиты *23*, *27* и *33*.

Многошпиндельный шпильковерт работает следующим образом. При отведении завинчивающего устройства от собранного узла к плите *33* срабатывает питатель магазинного типа *34* и две шпильки по пружинным лоткам *1* и *31* подаются в неуравновешенные втулки *13* и *16*, проходя через строго ориентированные наконечники *10* и *19* с втулками. Шпильки *12* и *17*, упираясь в стенки отверстий под втулки нижней плиты, удерживаются от выпадения. Шаговый конвейер убирает собранный узел и подает под устройство новый (условно не показан). Замыкается конечный выключатель под поданным узлом и подается команда на медленное выпускание сжатого воздуха из нижней полости пневмоцилиндра *32*. Устройство под действием собственной силы тяжести начинает опускаться (подводится к узлу).

Нижняя плита *15* опирается о полость узла и неуравновешенные втулки *13* и *16* за счет выступов их нижних плоскостей разворачиваются вокруг осей вместе со шпильками и располагаются вертикально под патронами *9* и *21*. Шрифты *14* доориентируют нижнюю плиту *15* устройства относительно положения резьбовых отверстий на узле. Одновременно с началом опускания устройства начинают вращение шпинделей шпильковертов вместе с патронами. При дальнейшем опускании устройства патроны вращающимися разрезными резьбовыми кулачками помогают шпилькам занять строго вертикальное положение и захватывают их за резьбовую часть, наживляют, завинчивают и затягивают. Шпильковерты отключаются. Подается сжатый воздух в нижнюю полость пневмоцилиндра *32*. Происходит отвод завинчивающего устройства от собираемого узла. Процесс сборки завершен.

Для обеспечения надежной работы многошпиндельных шпильковертов и исключения заклинивания от перекосов шпилек и осей *6* и *24* необходимо, чтобы внутренние диаметры неуравновешенных втулок *13* и *16* были бы больше диаметров шпилек на удвоенную величину суммы погрешностей: относительного смещения осей резьбовых отверстий на узле и осей отверстий втулок, а также перекоса осей соединяемых деталей. Аналогичное требование к зазорам между диаметрами осей *6* и *24* и отверстиями на плите *23*.

Библиографический список

1. Житников Ю.З., Житникова И.В. Ручные одношпиндельные гайковерты на основе муфт предельного момента повышенной точности осевых сил затяжки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 4. С. 25—30.

2. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Ручной одношпиндельный гайковерт ударного действия повышенной точности с системой контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 6. С. 13—16.

3. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Многошпиндельное переналаживаемое завинчивающее устройство // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 7. С. 19—23.

4. **А.С. № 1620261** СССР, МКИ^3 В 23Р19/06 Многошпиндельный гайковерт для завинчивания шпилек / Ю.З. Житников, В.А. Проньков. Бюл. № 2. 1991.

5. **А.С. № 1641558** СССР, МКИ^3 В 23Р19/06 Устройство питания шпильками завинчивающего устройства / Ю.З. Житников, В.А. Проньков, Ю.А. Рыбкин. Бюл. № 14. 1991.

6. **А.С. № 1726198** СССР, МКИ^3 В 23Q7/10 Загрузочное устройство / Ю.З. Житников, И.Е. Голованов. Бюл. № 14. 1992.

7. **Воркуев Д.С., Миронова Е.А.** Многошпиндельный гайковерт на основе муфт предельного момента дифференцированных механизмов, механизмов свободного хода // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2014. № 1 (28). С. 101—104.

УДК 621.382.2

В.В. Жуков, *канд. техн. наук,* **С.А. Степанов** *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: y-stepan@yandex.ru

Универсальная камера для обработки маскированных поверхностей мелкодисперсным абразивным порошком

Рассмотрено устройство универсальной пескоструйной камеры и ее основных элементов, особенности их конструкции.

Considered the multipurpose sandblasting cabin and its basic elements, the features of their design.

Ключевые слова: пескоструйная резка, абразивный материал, универсальная камера, бункер для абразивного материала, циклон-сепаратор.

Keywords: sandblastin cutting, abrasive material, multipurpose cabin, tank for abrasive material, cyclone separator.

Пескоструйная обработка широко распространена в промышленности. Ее применяют, в частности, для очистки и обезжиривания поверхностей, придания необходимой шероховатости, матирования и т.д. Одним из подвидов метода является пескоструйная обработка предварительно маскированной поверхности. Этот способ нашел широкое применение в декорировании для создания на стекле, керамике и других поверхностях объемных изображений и в электронной промышленности для разделения планарных и непланарных изделий.

Оборудование для струйно-абразивной резки сильно различается размерами, элементами конструкции, заложенными в основу принципами формирования струи абразивного материала и т.д. От небольших камер, которые можно установить на верстак, до камер объемом в несколько десятков кубических метров для обработки крупногабаритных объектов (таких как кузов автомобиля), в которых оператор должен находиться в скафандре.

Существуют камерные и бескамерные пескоструйные аппараты. Вторые, использующие открытое сопло, применяют для обработки нетранспортабельных объектов (таких как стены зданий или механизмы больших габаритов). Камерные же установки можно разделить на два вида — герметичные и проходного типа. В герметичных камерах с момента загрузки заготовки до момента ее извлечения камера абсолютно герметична, и абразивный материал не имеет возможности покинуть замкнутое пространство камеры. Камеры проходного типа негерметичны в момент обработки. Они имеют входное и выходное отверстия, куда подают непрерывным потоком заготовки. Через эти же отверстия абразивный материал может попадать в помещение цеха. Это проблема, которую необходимо решать в процессе разработки подобных камер. Одним из способов применения камер такого типа является матирование стекол.

Самые простые пескоструйные камеры имеют ручную подачу инструмента и одно обрабатывающее сопло, управляемое руками оператора. Более сложные установки имеют автоматизированную подачу обрабатываемых деталей, несколько обрабатывающих сопел и механизмы их перемещения.

Однако существует ряд узлов, агрегатов и принципов работы, который присутствует во всех струйно-абразивных установках. Для пескоструйных камер проходного типа таковыми являются: сбор и регенерация абразивного материала в бункере для абразива, средства ворошения абразивного материала, тип сопел, заборники и дозаторы подачи абразивного материала к соплам.

Рассмотрим конструкцию установки пескоструйной резки с камерой проходного типа и автоматизированной подачей заготовок и обрабатывающих сопел. Схема установки представлена на рис. 1. Она состоит из рабочей камеры *5*, через которую проходит механизм по-

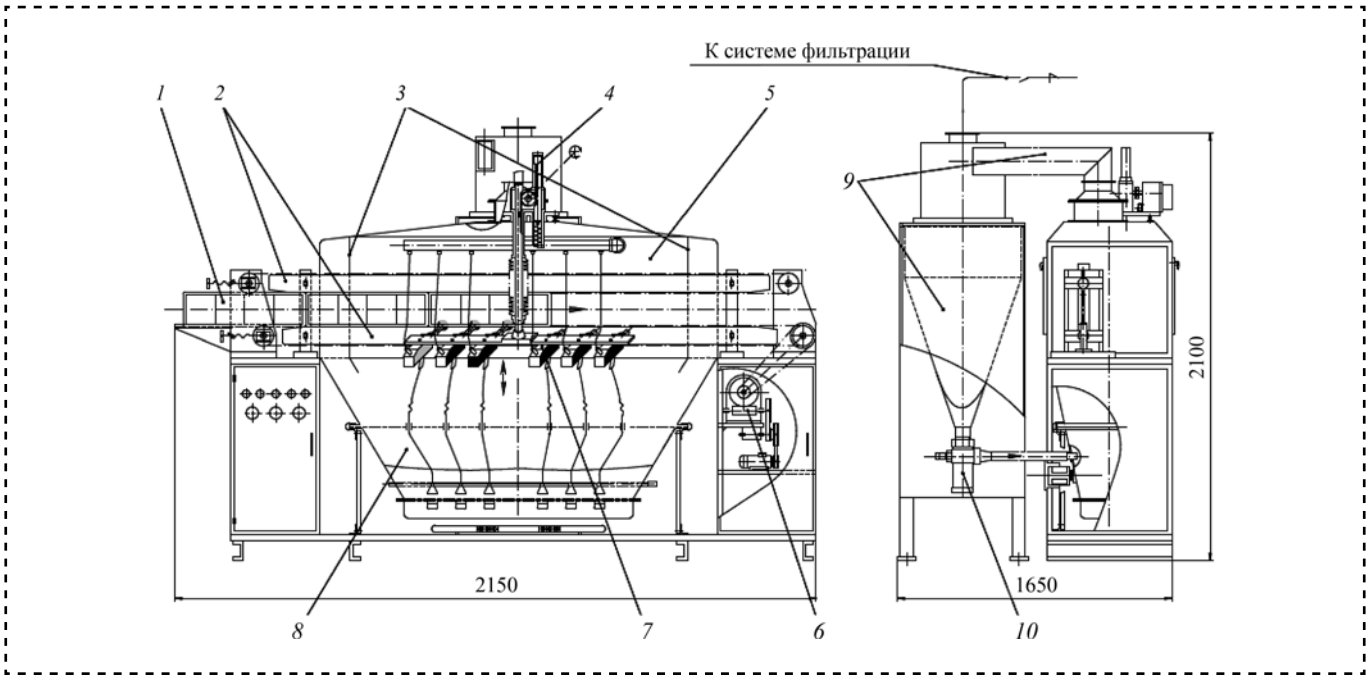


Рис. 1. Опытная установка пескоструйной резки НПП ТЭЗ

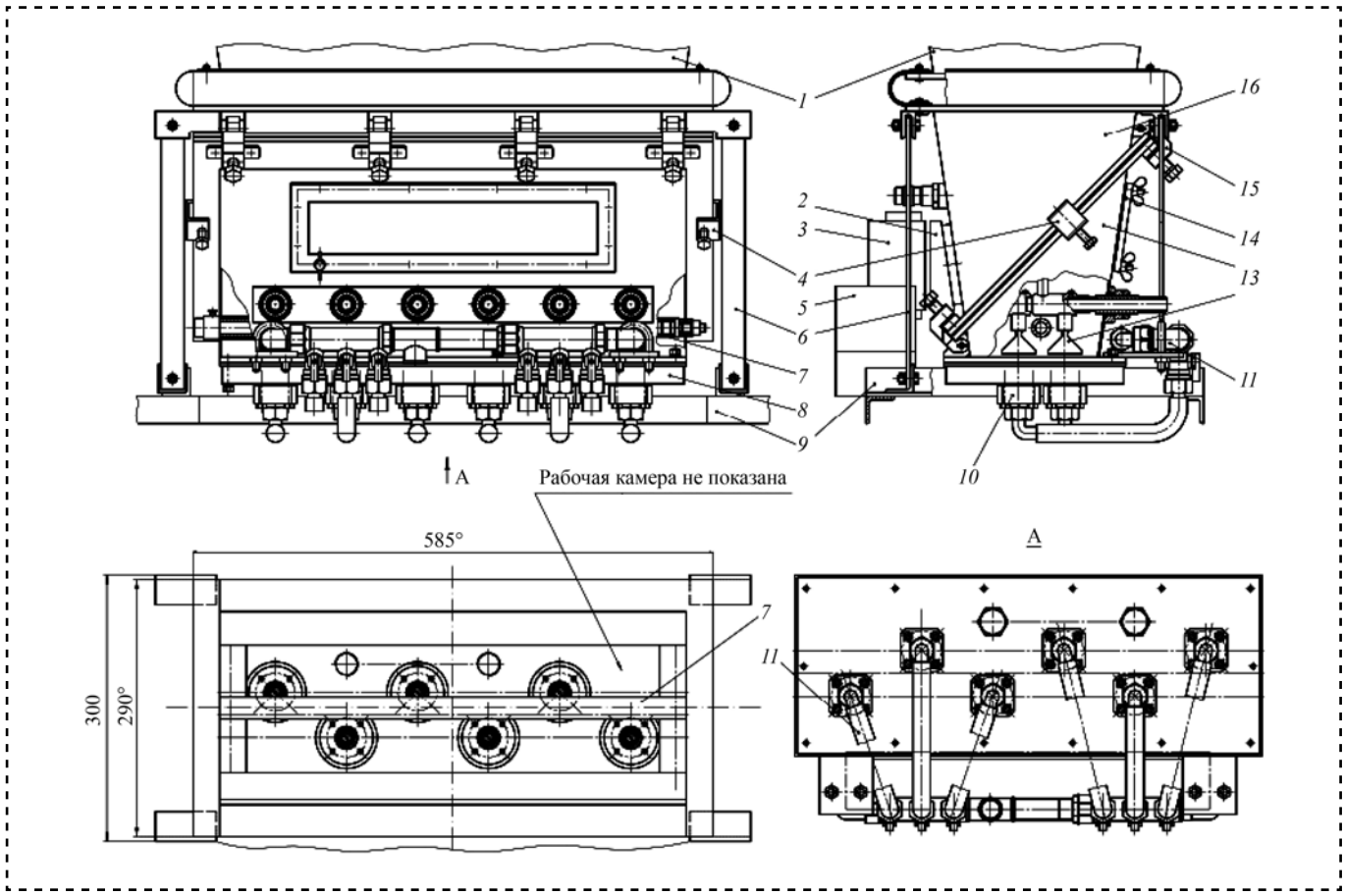


Рис. 2. Бункер для абразивного материала

дачи кассет с обрабатываемыми пластинами *2*. Он представляет собой две цепи, верхнюю и нижнюю, ведущие звездочки которых вращаются в противоположных направлениях, что обеспечивает захват кассеты с заготовками *1* и ее перемещение через камеру.

В действие механизм приводится электромеханическим приводом *6*. Поскольку механизм перемещения кассет проходит камеру насквозь и может выносить на обработанных кассетах и своих элементах абразивный материал, камера оснащена двумя обеспыливающими пневматическими контурами *3*. В камере в вертикальной плоскости перемещаются шесть обрабатывающих сопел, закрепленных на единой рейке *7*. Движение сопел обеспечивает механизм возвратно-поступательного перемещения *4* с электроприводом. Абразивный материал, циркулирующий в камере, частично падает в бункер *8*, частично вместе с воздухом отсасывается в циклон-сепаратор *9*.

В воздухе, поступающем в циклон, присутствует множество фракций таких материалов, как абразивный порошок, кремний, стекло и металл. Циклон используют для первоначальной очистки этого загрязненного воздуха. В нем отсеиваются зерна абразивного материала, которые попадают в нижний бункер. Воздух, прошедший первоначальную очистку, поступает в систему фильтрации, где происходит его окончательная очистка. Из бункера, расположенного внизу циклона, пневмонасос *10* перекачивает регенерированный абразивный материал в бункер установки.

Используемый в установке материал — мелкодисперсный абразивный порошок (электрокорунд) фракцией 20...40 мкм — накладывает свои требования к установке. При высокой влажности песок приобретает свойства цемента и превращается в твердую монолитную массу. Необходимо обеспечить его просушку и не допустить слеживаемости. Эти факторы были учтены при разработке бункера установки. Общий вид бункера представлен на рис. 2

Основой бункера является разъемный, состоящий из верхней *16* и нижней *13* частей сварной корпус, который через четыре плоские пружины *6* крепится к раме установки *9* и через гибкий фланец — к нижней части рабочей камеры *1*. Верхняя и нижняя части корпуса соединены через наклонный фланец, который удерживают откидные крючки *15* и хомуты *4*.

К нижней части бункера через нижний фланец прикреплено аэроднище *8*, снабженное шестью клапанами *10*. На передней стенке расположено окно *14*. В нижней части бункера также закреплен нагреватель *7*, шесть заборников абразивного материала *12* и замкнутый пневмоконтур *11*. Контур соединен с клапанами барбатера через гибкие шланги *17*.

На задней стенке верхней части бункера закреплена плита *2* электровибратора. Сам электровибратор *13*, закреплен на основании *5*, которое прикреплено к раме установки.

Каждый из шести заборников абразивного материала питает отдельное обрабатывающее сопло. Благодаря тому, что под каждым заборником расположен один из пневматических клапанов аэроднища, обеспечен равномерный забор песка из бункера. Для этого должна быть обеспечена соосность между клапаном и заборником. Для большей компактности клапаны в аэроднище размещены в шахматном порядке.

Воздух, поступающий через клапаны, не дает абразивному материалу слеживаться и обеспечивает его равномерное распределение по днищу бункера.

Конструкция клапана представлена на рис. 3, *а*. Клапан имеет выполненный из капролона корпус *6*, который крепится к барбатеру *4* четырьмя шпильками М6. Воздух от пневмоконтура по гибким шлангам поступает в клапан через присоединительный фланец *12*. Затем через отверстия в корпусе клапана *3* он поступает к клапану *2*, закрепленному на оси *1*. Под давлением воздуха клапан поднимается, обеспечивая прохождение воздуха в бункер. На противоположном конце штока предусмотрена гайка *11*, которая через шайбу *10* и кольцо *9* контролирует максимальный ход штока клапана. Регулируя ее положение, можно регулировать степень открытия клапана.

Для предотвращения попадания абразивного материала в клапан и, как следствие, его быстрого износа при прекращении подачи воздуха предусмотрена возвратная пружина *7*. Для герметизации в клапане предусмотрены резиновые прокладки *5* и *8*.

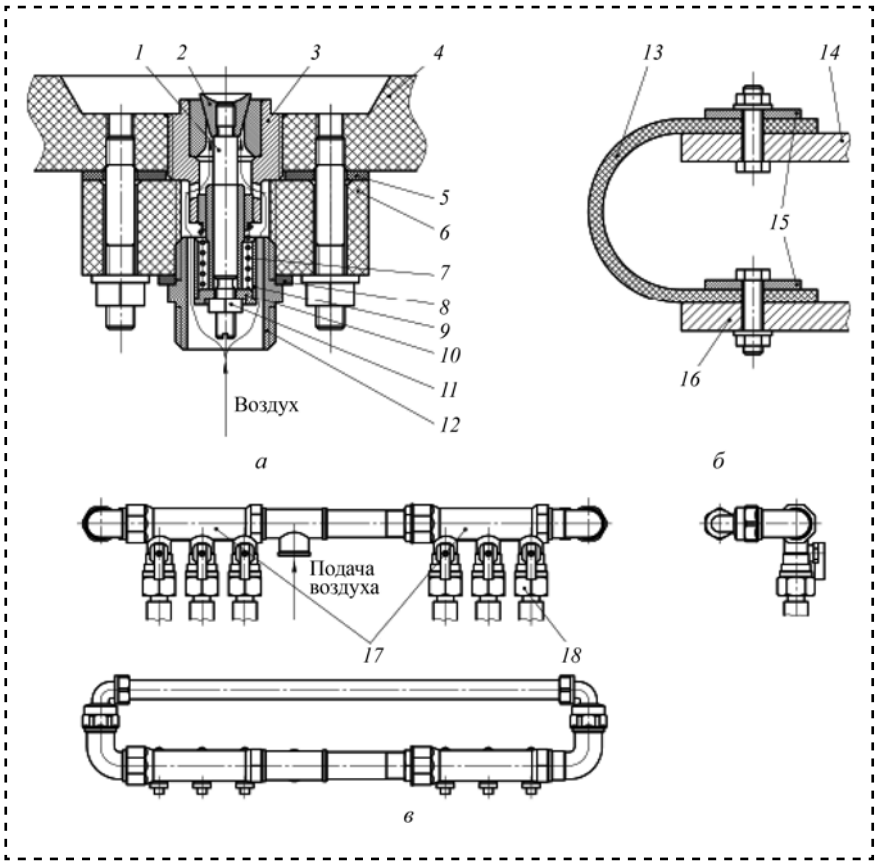


Рис. 3. Элементы конструкции бункера

Воздух к клапанам подается из пневматического контура по гибким шлангам. Устройство контура показано на рис. 3, *в*. Контур имеет замкнутую конструкцию, что обеспечивает одинаковое давление воздуха в любой точке контура, что, в свою очередь, обеспечивает равномерную работу всех клапанов. Расход воздуха, поступающего к каждому из клапанов, можно регулировать вентилями на тройниках *17* контура, к которым крепятся гибкие шланги *18*. Контур собран из стандартных деталей, что значительно облегчает его сборку.

Нагреватель служит для сушки абразива.

Оседающий из камеры абразивный материал может задерживаться на стенках бункера. Для предотвращения этого и лучшего распределения песка по днищу бункера предусмотрен электровибратор.

Чтобы вибрация от бункера *16* не передавалась на остальную установку, к ее раме он крепится на подвеске, состоящей из четырех плоских пружин, закрепленных по углам. Нижнее крепление пружин — жесткое, верхнее — свободное, что снижает негативное влияние вибратора на стенки бункера. Ранее, при жестком верхнем закреплении бункера на задней стенке, где закреплена пластина вибратора, спустя несколько месяцев эксплуатации, образовывалась трещина. Чтобы сохранить герметичность соединения бункера *16* с рабочей камерой *14*, и при этом избежать передачи вибрации от бункера к камере, они были соединены через гибкий фланец *13*, показанный на рис. 3, *б*. Крепление осуществлено за счет болтов с прижимными планками *15*.

Бункер прост в эксплуатации, что достигается за счет его разделения на две части. Верхняя через гибкий фланец обеспечивает его контакт с остальной установкой. Нижняя несет в себе все основные элементы системы питания абразивным материалом (заборники, аэроднище с клапанами, питающий их пневмоконтур). Это позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на монтаж/демонтаж бункера по сравнению с предыдущими вариантами бункера, где пневмоконтур располагался на раме установки и требовал предварительного демонтажа, а корпус бункера был единым. Это требовало каждый раз разбирать гибкий фланец и отсоединять бункер от пружин подвески. К тому же масса снимаемого бункера была значительно больше.

Таким образом, можно сказать, что подобная конструкция бункера обеспечивает:

- равномерную подачу абразивного материала к соплам;
- равномерное распределение абразива по днищу бункера;
- предотвращение слеживаемости и слипания абразивного материала;
- облегчает эксплуатацию бункера.

Важный показатель работы установки — расход абразивного материала, который является достаточно дорогим веществом. Если бы установка имела только бункер для сбора абразивного материала, его расход был бы

очень большой. Часть песка, улетающая вместе с отсасываемым из камеры воздухом в вентиляцию, значительно больше той, что оседает вниз из камеры в бункер. Поэтому необходима система, которая будет отделять от воздуха большую часть частиц абразивного материала, при этом оставляя в нем мелкие частицы стекла, металла, кремния и сломанного абразивного порошка. Такая система представлена на рис. 4, *а*.

Система представляет собой доработанный промышленный циклон-сепаратор. Доработка заключается в установке внутри циклона *1* винтового патрубка *2* и блока перекачки абразивного материала *3*.

Винтовой патрубок (рис. 4, *б*) создан для разгона дисперсионных частиц за счет центробежной силы. Частицы, ударяясь о стенки патрубка, теряют свою скорость и падают на дно циклона, откуда транспортируются в рабочую камеру пескоструйной установки.

Для транспортировки осажденного абразивного материала используется питатель (рис. 4, *в*), состоящий из пневмонасоса *4* и вибратора *5*.

Как показали проведенные исследования, при осаждении абразивного материала основополагающими факторами, влияющими на эффективность работы такой системы, являются:

1) давление на входе в перекачивающее устройство, а также его конструкторские особенности — зазор между струйным соплом и патрубком. Значение давления на входе в перекачивающее устройство напрямую влияет на значение создаваемого разрежения в верхней части устройства. Данное разрежение необходимо для создания дополнительной силы всасывания со дна циклона и перемещения осажденного абразива по пневмотранспортному каналу;

2) слеживание и слипание осажденного абразивного материала на дне циклона. Необходимо поддерживать хорошую текучесть осажденного абразива для его транспортировки;

3) траектория движения частиц. На эффективность осаждения абразивного материала в циклоне напрямую влияет траектория и длинна полета осаждаемых частиц. Создавая винтовую траекторию, можно за счет центробежных сил повысить силы трения о внутреннюю поверхность циклона и тем самым сбавить скорость полета осаждаемых частиц, что приведет к их немедленному осыпанию на дно циклона;

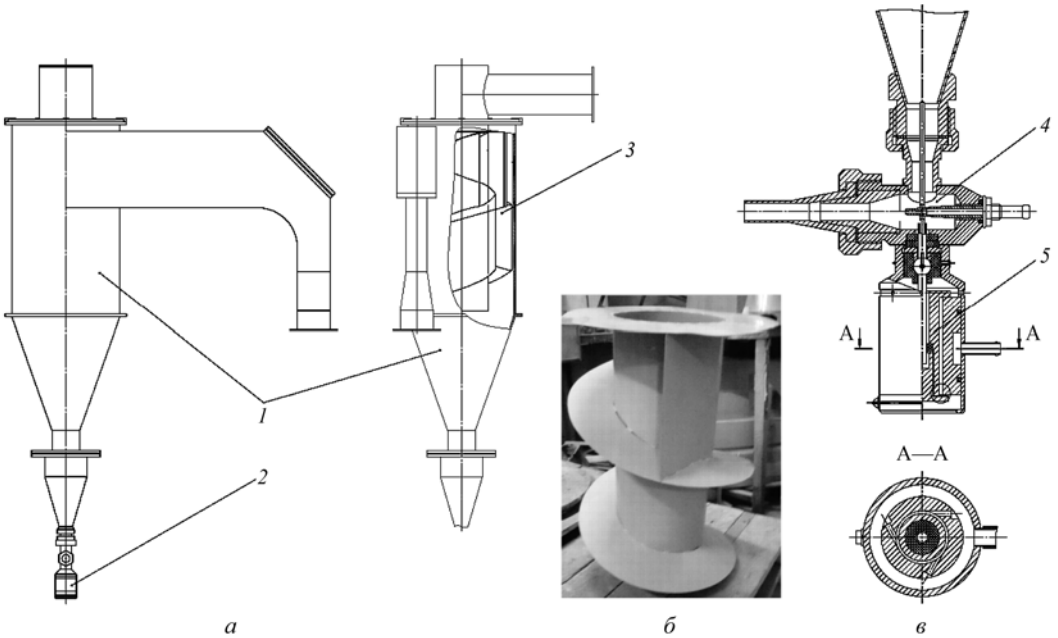


Рис. 4. Система регенерации абразивного материала:
а — блок регенерации абразивного материала; *б* — питатель; *в* — винтовой патрубок

Рис. 5. Опытная установка пескоструйной резки

4) сила всасывания в общую систему вытяжной вентиляции. Регулируя площадь поперечного сечения трубы вытяжной вентиляции, можно достичь оптимальной тяги воздуха из циклона, при которой наблюдается хорошая осаждаемость абразивного материала.

Описанные элементы конструкции реализованы в опытно-промышленной пескоструйной установке, использующейся на НПП ТЭЗ для разделения полупроводниковых кремниевых пластин на диски-кристаллы. Общий вид установки представлен на рис. 5.

Данная установка пескоструйной резки имеет производительность 10—12 пластин в час и позволяет за время обработки произвести удаление материала подложки между защитными дисками на глубину, на 40...50 % большую ее толщины. После резки, маскированная защитными дисками подложка состоит из набора полупроводниковых дисков-кристаллов, закрепленных на стеклянной пластине и разделенных между собой промежутками не более 350 мкм.

Объем загружаемого в бункер абразивного материала составляет 20 л, при этом потери за одну восьмичасовую рабочую смену составляют 4...5 л.

Выводы

1. *Использование мелкодисперсного абразивного материала при пескоструйной обработке требует наличия в оборудовании элементов, не допускающих его слеживания и увлажнения.*

2. *На равномерность подачи абразивного материала к соплам оказывают влияние такие факторы, как равномерное распределение абразивного материала по днищу бункера и соосность заборников и пневматических клапанов.*

3. *Система регенерации абразивного материала из воздуха, откачиваемого из рабочей камеры, существенно снижает расход абразивного материала.*

Библиографический список

1. **Жуков В.В., Дощечкин Е.Д.** Технология изготовления полимерных маскирующих покрытий с использованием клеевых соединений при пескоструйной резке полупроводниковых материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 10. С. 20—23.

2. **Жуков В.В., Степанов С.А.** Обеспечение точности при разделении маскированных полупроводниковых пластин на кристаллы // IV Всерос. конф. молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России". Электронный сборник материалов конференции, сентябрь 2011 г. М., 2011.

УДК 621.757

Е.А. Миронова *(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)*
E-mail: elena_mir_a@mail.ru

Адаптивная затяжка групповых резьбовых соединений по моменту

Описан процесс адаптивной затяжки групповых резьбовых соединений по моменту на примере двухшпиндельного гайковерта.

Offers the adaptive tightening toque process of the group theaded connection by moment as an example of two-spindle nut runner.

Ключевые слова: гайковерт, муфта предельного момента, дифференциальный механизм, погрешность момента затяжки.

Keywords: nut runner, overtime clutch, differential mechanism, error of tightening toque moment.

Для математического описания процесса затяжки групповых резьбовых соединений с адаптацией по моменту воспользуемся дифференциальным уравнением вращательного движения [1]:

$$J_0\ddot{\bar{\varphi}} = \sum \bar{M}^e_{j(0)}, \qquad (1)$$

где J_0 — приведенный момент инерции вращающихся элементов гайковерта к центру O;

$\ddot{\bar{\varphi}}$ — вектор углового ускорения;

$\sum \bar{M}^e_{j(0)}$ — вектор моментов внешних сил, действующих на механическую систему.

Дифференциальное уравнение поворота резьбовой детали при окончательной затяжке в проекции на ось, направленную по оси вращения шпинделя, с учетом действующих моментов запишется в виде:

$$J_z\ddot{\varphi} = M_{\text{кр}} - M_{\text{пр}} - M_{\text{с}}, \qquad (2)$$

где J_z — приведенный момент инерции вращающихся элементов гайковерта к оси шпинделя;

$M_{\text{кр}}$ — крутящий момент, который действует на резьбовое соединение;

$M_{\text{пр}}$ — момент предварительной затяжки резьбового соединения;

$M_{\text{с}}$ — момент сопротивления вращению в резьбовом соединении и на торце головки болта.

Заметим, что момент предварительной затяжки контролируется по моменту срабатывания муфты предельного момента. Согласно работе [3] необходимо назначить момент предварительной затяжки, не превосходящий 10 % от номинального значения момента затяжки $M_{\text{з}}$, т.е.

$$M_{\text{пр}} = (2...10)\cdot 10^2 M_{\text{з}}. \qquad (3)$$

Момент сопротивления в резьбовом соединении зависит от угла поворота детали φ и от угловой скорости поворота $\dot{\varphi}$:

$$M_{\text{с}} = B\varphi + B_1\dot{\varphi} + M_{\text{диф}}, \qquad (4)$$

где

$$B = Q_{\text{пр}}\frac{d_2}{2}\text{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)b + Q_{\text{пр}}\frac{1}{3}\mu_{\text{т}}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}; \qquad (5)$$

$$B_1 = Q_{\text{пр}}\frac{d_2}{2}\text{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)b_1. \qquad (6)$$

Здесь $Q_{\text{пр}}$ — предварительная осевая сила затяжки резьбового соединения, составляющая 2...10 % от номинального значения осевой силы затяжки $Q_{\text{з}}$, т.е.

$$Q_{\text{пр}} = (2...10)\cdot 10^{-2} Q_{\text{з}}; \qquad (7)$$

b — коэффициент вязкого трения в зависимости от угла поворота резьбовой детали φ;

b_1 — коэффициент вязкого трения в зависимости от угловой скорости вращения резьбовой детали $\dot{\varphi}$;

d_2 — средний диаметр резьбы;

p — шаг резьбы;

ρ — угол трения в резьбе;

$\mu_{\text{т}}$ — коэффициент трения на торце головки болта;

D — наружный диаметр опорной поверхности головки болта (равен размеру под ключ головки болта);

d_0 — диаметр тела болта;

$M_{диф}$ — момент дифференциального механизма, который согласно [4] составляет 10...15 % от номинального значения момента затяжки $M_з$.

С учетом формул (4)—(6) дифференциальное уравнение (2) приводится к виду:

$$J_z\ddot{\varphi} = M_{кр} - M_{пр} - M_{диф} - Q_{пр}\frac{d_2}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)b_1\dot{\varphi} - \\ - Q_{пр}\frac{d_2}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)b\varphi - Q_{пр}\frac{\mu_т}{3}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}\varphi. \quad (8)$$

Обозначив

$$A = \frac{1}{J_z}\left[Q_{пр}\frac{d_2}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)b + Q_{пр}\frac{\mu_т}{3}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}\right];$$

$$A_1 = \frac{1}{J_z}Q_{пр}\frac{d_2}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)b_1;$$

$$A_2 = \frac{M_{кр} - M_{пр} - M_{диф}}{J_z},$$

получим линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами:

$$\ddot{\varphi} + A_1\dot{\varphi} + A\varphi = A_2. \quad (9)$$

Решим уравнение (9) и найдем φ для резьбовых соединений М12. Затем вычислим момент сопротивления M по формуле [2]:

$$M = \frac{\varphi F_б E_б p}{2\pi l}\left[\frac{1}{3}\mu_т\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} + \frac{d_2}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{p}{\pi d_2} + \rho\right)\right], \quad (10)$$

где $F_б$ — площадь сечения тела болта;

$E_б$ — модуль упругости материала болта;

l — длина растягиваемой части болта.

Значения параметров для расчета

Параметр	Числовое значение	Параметр	Числовое значение
J_z, кг·см·с^2	20,35	D, см	2,8
b_1, кг·см·с	0,72	d_0, см	1,2
b, кг·см/рад	0,153	$M_з$, кг·см	1800
d_2, см	1, 135	$F_б$, см^2	0,926
p, см	0,175	$E_б$, Н/см^2	$15{,}38\cdot10^4$
ρ, рад	0,4	l, см	1
$\mu_т$	0,2	—	—

Параметры для расчетов приведены в таблице.

Расчет проводили для номинальных значений таблицы и для случаев, когда коэффициенты вязкого трения и трения скольжения, а также коэффициент трения на торце головки болта и угол трения в резьбе изменялись на 20 и 30 %.

Получили следующие результаты:

1) для номинальных значений φ = 1,44 рад, $M = 2{,}769\cdot10^3$ кг·см;

2) изменения на 20 %: φ_1 = 1,317 рад, M_1 = $= 2{,}53\cdot10^3$ кг·см (увеличение параметров) и φ_2 = 1,542 рад, $M_2 = 2{,}962\cdot10^3$ кг·см (уменьшение параметров);

3) изменения на 30 %: φ_1 = 1,257 рад, M_1 = $= 2{,}414\cdot10^3$кг·см и φ_2 = 1,591 рад, M_2 = $= 3{,}056\cdot10^3$ кг·см.

Процесс затяжки резьбовых соединений с учетом пассивной адаптации по моменту сопротивления можно представить в виде, приведенном на рис. 1.

Из графика, подтвержденного экспериментом, видно, что если одна из резьбовых деталей будет иметь большую длину нарезной резьбы и автоматизированное наживление деталей не одновременно, то за счет пассивной адаптации гайковерт обеспечит одинаковую затяжку обеих резьбовых деталей.

Учитывая, что дифференциальный механизм реагирует на разность моментов по осям в пределах 10...15 % [4], в положении *A* одна из кинематических ветвей гайковерта остановится и будет неподвижна до тех пор, пока вторая ветвь не дойдет до положения *B*. Затем оба

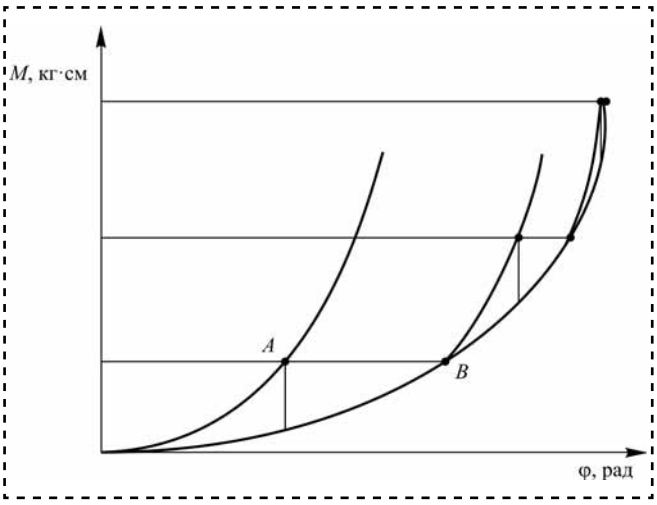


Рис. 1. Зависимость моментов затяжки *M* от угла φ поворота резьбовых деталей

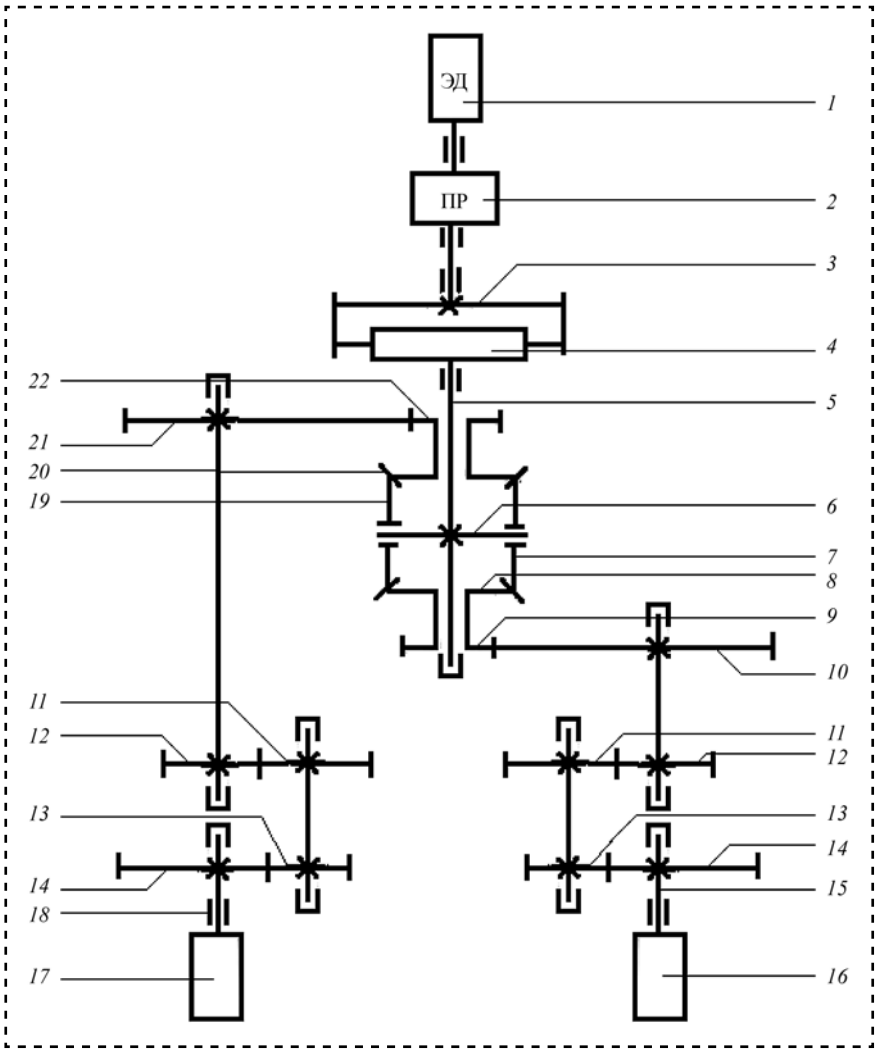


Рис. 2. Двухшпиндельный гайковерт на основе муфты предельного момента и дифференциального механизма

шпинделя начнут вращаться одновременно и через некоторый момент времени при достижении разности моментов сопротивления по осям 10...15 % один из шпинделей вновь остановится и будет дожидаться другого до достижения равенства моментов сопротивления на обоих шпинделях и т.д.

В тех случаях, когда необходимо одновременное прижатие скрепляемых деталей групповыми соединениями, но не требуется высокая точность момента затяжки, можно предложить следующую кинематическую схему многошпиндельного завинчивающего устройства с пассивной адаптацией (рис. 2).

Устройство состоит из электродвигателя, планетарного редуктора, муфты предельного момента, дифференциального механизма, зубчатых передач и шпинделей.

От электродвигателя *1* вращение передается через планетарный редуктор *2* на муфту предельного момента с полумуфтами *3*, *4*, а затем на ось дифференциального механизма, где движение разделяется на два вращения.

Первое вращение: через ось *5* дифференциала, которая жестко связана с осью *6* сателлита *19*, передается на сдвоенную шестерню *20*, *22*, взаимодействующую с колесом *21* и далее через зубчатые передачи *11*, *12* и *13*, *14* на шпиндель *18* к патрону *17*.

Второе вращение: от оси *5* через ось *6* на сателлит *7* передается сдвоенной шестерне *8*, *9*, взаимодействующей с колесом *10*, а затем через зубчатые передачи *11*, *12* и *13*, *14* на шпиндель *15* к патрону *16*.

Как только суммарный момент сопротивления вращению будет равен моменту срабатывания муфты предельного момента, гайковерт остановится.

Благодаря такой кинематической схеме гайковерта при сборке обеспечиваются практически одинаковые моменты затяжки на всех шпинделях.

Библиографический список

1. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. В 2-х т. Т. 2. М.: Наука, 1979. 543 с.

2. **Воркуев Д.С., Житников Ю.З.** Разработка семейства высокоточных многошпиндельных гайковертов нового класса на основе одного привода / под общ. ред. Ю.З. Житникова. М.: Машиностроение, 2009. 204 с.

3. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов; под общ. ред. Ю.З. Житникова / Ю.З. Житников и др. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.

4. **Наруб А.Н.** Автомобили: Рабочие процессы и расчет механизмов и систем: учебник для вузов. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр "Академия", 2008. 256 с.

5. **Воркуев Д.С., Миронова Е.А.** Многошпиндельный гайковерт на основе муфт предельного момента, дифференциальных механизмов, механизмов свободного хода // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2014. № 1(28). С. 101—103.

УДК 621.757

Б.Ю. Житников, *д-р техн. наук,* **С.В. Блинов** *(Владимирский юридический институт ФСИН России)*
E-mail: zhitnikovy@mail.ru

Точность затяжки резьбовых соединений гайковертами на основе центробежных сил инерции

Дан анализ достижимой точности осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпиндельными завинчивающими устройствами на основе центробежных сил инерции и определены пути решения проблемы повышения их точности.

The analysis of the achievable accuracy axial forces Fastener Tightening screw-spindle devices based on centrifugal forces of inertia and the ways solving the problem increasing their accuracy.

Ключевые слова: завинчивающее устройство, центробежные силы инерции, точность затяжки, резьбовые соединения.

Keywords: screw-down device, the centrifugal forces of inertia, precision tightening threaded connections.

В работах [5, 6] была сделана попытка создания альтернативных одношпиндельных завинчивающих устройств на основе центробежных сил инерции, тем не менее они не нашли применения в производстве.

Выявим причины, ограничившие использование их в промышленности, и пути повышения точности завинчивающих устройств на основе центробежных сил инерции.

Кинематическая схема этого устройства представлена на рис. 1. Завинчивающее устройство состоит из двигателя *2* как электрического, так и пневматического действия, возбудителя поворотных колебаний (импульсатора) *7*, обеспечивающих формирование центробежных сил инерции, а следовательно, и импульсов моментов для завинчивания и затяжки резьбовых соединений, механизма свободного хода *16* храпового типа, динамической опоры *17*, предназначенной для гашения реактивного момента, возникающего в момент затяжки соединения, торможения, шпинделя *14* с патроном *15* для удержания резьбовой детали. Механизм завинчивающего устройства расположен в корпусе *1*, снабжен рукояткой *26* для удержания устройства в процессе сборки резьбовых соединений.

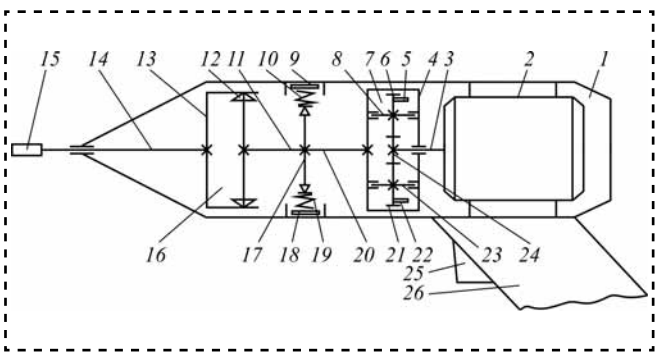


Рис. 1. Кинематическая схема завинчивающего устройства

Предварительно рассмотрим работу возбудителя поворотных колебаний (импульсатора), в котором формируются импульсы моментов под действием центробежных сил инерции (рис. 2).

При вращении шестерни *24* и сателлитов *6* и *21* от неуравновешенных масс *5* и *22* возни-

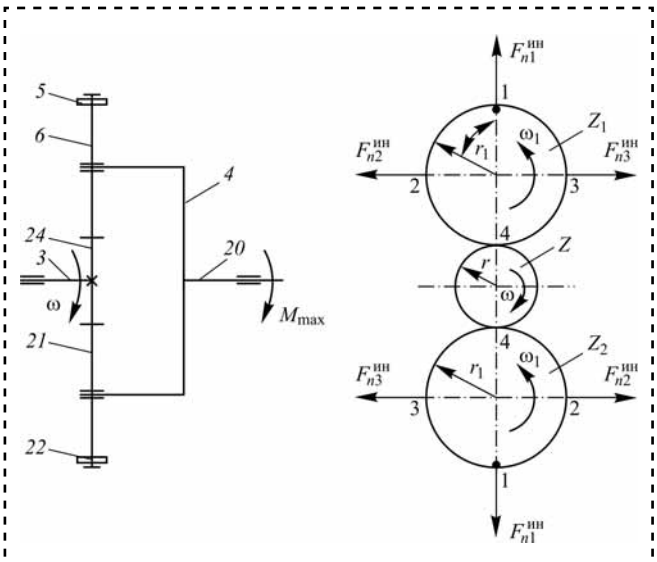


Рис. 2. Принцип работы импульсатора

кают центробежные силы инерции, которые направлены от центров вращения сателлитов.

В проекции на горизонтальные оси появляются моменты импульсов:

$$M = 2F_n^{\text{ин}}(r + r_1)\sin\varphi = 2m\omega_1^2 r_1 (r + r_1)\sin\omega_1 t, \quad (1)$$

где $F_n^{\text{ин}}$ — центробежная сила инерции;

r — радиус шестерни;

r_1 — радиус сателлита;

φ — угол поворота грузика сателлита;

m — масса грузика;

ω_1 — угловая скорость вращения сателлита;

t — время импульса момента.

При вращении неуравновешенной массы из положения 1 в положение 4 в проекции на горизонтальную ось появляется положительный импульс момента, который сначала возрастает, а затем убывает до нуля. Положительный импульс момента направлен в сторону завинчивания и затяжки резьбового соединения и передается на шпиндель завинчивающего устройства. При вращении неуравновешенной массы из положения 4 в положение 1 появляется отрицательный импульс момента, который не передается на шпиндель.

Устройство (см. рис. 1) работает следующим образом. При нажатии на курок *25* пускается и начинает вращаться вал двигателя *2*, вращение от которого передается шестерне *24* и далее на сателлиты *6*, *21* с неуравновешенными массами *5*, *22*. В импульсаторе *7* при соответствующем положении грузиков формируется положительный момент импульса, под действием которого поворачивается водило и вал *20*, жестко связанный с динамической опорой *17* и валом *11* механизма свободного хода *16* храпового типа. В результате затяжки резьбовой детали динамическая опора под действием центробежных сил инерции своими колодками *9*, *18* прижимается к корпусу *1* завинчивающего устройства, создавая момент сил трения, уменьшая воздействие реактивного момента на руку рабочего. На валу *11* расположена обойма с подпружиненными собачками *12*. При воздействии на обойму положительного импульса собачки *12* поворачивают храповое колесо *13* и момент через шпиндель *14*, патрон *15* передается на резьбовую деталь, поворачивая ее на некоторый угол.

При воздействии отрицательного импульса момента обойма с собачками поворачивается в противоположную сторону, а подпружиненные собачки проскальзывают по зубьям храпового колеса, не передавая момента. Процесс затяжки резьбового соединения продолжается до тех пор, пока приведенный момент импульса к оси шпинделя не уравновесится моментом сопротивления в резьбовом соединении.

Из анализа кинематической схемы завинчивающегося устройства на основе центробежных сил инерции возникают следующие случайные погрешности моментов затяжки резьбовых соединений от:

- моментов сопротивления при затяжке в резьбовых соединениях $\delta M_{\text{р}}$;
- частоты вращения вала двигателя, а следовательно, сателлитов с неуравновешенными массами δM_{ω};
- нестабильности отключения завинчивающего устройства $\delta M_{\text{от}}$;
- кинематической погрешности храпового механизма $\delta M_{\text{к}}$;
- моментов сопротивления вращению шпинделя в храповом зацеплении и подшипниках, вращающихся элементов устройства $\delta M_{\text{с}}$.

В результате математического описания процесса затяжки завинчивающими устройствами на основе центробежных сил инерции получена система дифференциальных уравнений, описывающая каждый импульс момента:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + 2n\dot{\varphi}_1 + k^2\varphi_1 = A\sin\omega_1 t - B_1; \\ \ddot{\varphi}_2 + 2n\dot{\varphi}_2 + k^2\varphi_2 = A\sin\omega_1 t - B_2; \\ \ldots \\ \ddot{\varphi}_i + 2n\dot{\varphi}_i + k^2\varphi_i = A\sin\omega_1 t - B_i, \end{cases} \quad (2)$$

где $\ddot{\varphi}$ — угловое ускорение шпинделя;

$\dot{\varphi}$ — угловая скорость шпинделя;

φ — угол поворота шпинделя при воздействии импульса момента;

n — приведенное сопротивление вращению;

k — круговая или собственная частота колебаний;

A — амплитуда возмущающей силы;

ω_1 — угловая скорость вращения сателлита;

t — время действия импульса момента;

B — постоянная возмущающая сила.

При этом имеют место соотношеня:

$$\frac{b_1}{I_z} = 2n;\ \frac{b}{I_z} = r^2;$$
$$2\frac{m}{I_z}\omega_1^2 r_1 (r + r_1) i_\Sigma = A;\ \frac{k_{\text{пр}}}{I_z} M_\text{з} = B_1, \quad (3)$$

где b_1 — коэффициент вязкого трения в функции угловой скорости;

b — коэффициент вязкого трения в функции угла поворота резьбовой детали;

I_Σ — приведенный момент инерции вращающихся элементов устройства к оси шпинделя;

I_z — передаточное отношение к оси шпинделя;

$k_{\text{пр}} = 0{,}5$ — коэффициент момента предварительной затяжки резьбового соединения;

$M_\text{з}$ — номинальное значение момента затяжки резьбового соединения.

Следовательно, появится случайная погрешность момента затяжки от скорости поворота резьбовой детали — $\delta M_\text{ф}$.

Кроме того, возникает систематическая погрешность момента затяжки резьбовых соединений от неточности изготовления элементов импульсатора — $\delta M_\text{и}$.

Суммарная погрешность моментов затяжки резьбовых соединений завинчивающими устройствами на основе центробежных сил инерции

$$\delta M_\varepsilon = \sqrt{\begin{pmatrix}\delta M_\text{р}^2 + \delta M \omega_\omega^2 + \delta M_\text{от}^2 + \\ + \delta M_\text{к}^2 + \delta M_\text{с}^2 + \delta M_\text{ф}^2\end{pmatrix}} + \delta M_\text{и}. \quad (4)$$

Учитывая, что для обеспечения момента затяжки завинчивающие устройства, согласно кинематической схеме рис. 1, должны иметь неуравновешенные грузики весом не менее 100 г, а частоту вращения сателлитов — порядка 600 мин$^{-1}$.

Найдем погрешности моментов затяжки шпилек.

Расчеты показали слишком большие значения погрешности моментов затяжки шпилек диаметром 12 мм, что недопустимо.

Поэтому для создания шпильковертов и гайковертов необходимо конструктивно решить следующие задачи:

- повысить момент затяжки резьбовых соединений;
- уменьшить неуравновешенную массу сателлитов;
- довести частоту вращения сателлитов до 150 мин$^{-1}$;
- контролировать качество затяжки резьбовых соединений не по моменту, а по осевой силе затяжки, этим самым практически исключив погрешности от моментов сопротивления в резьбовом соединении:
- повысить производительность сборки резьбовых соединений, обеспечивая процесс завинчивания, минуя импульсатор;
- ввести в конструкцию систему управления отключения завинчивающих устройств.

Библиографический список

1. **Воркуев Д.С., Житников Ю.З.** Разработка семейства высокоточных многошпиндельных гайковертов нового класса на основе одного привода: монография / под общ. ред. Ю.З. Житникова. М.: Машиностроение, 2009. 204 с.

2. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Инерционный гайковерт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 7. С. 19—23.

3. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Сравнительный анализ достижимой точности способов обеспечения и контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 8. С. 24—27.

4. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Описание процесса ударной затяжки резьбовых соединений с учетом потерь при ударе на упругопластические деформации взаимодействующих поверхностей // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2014. № 1. С. 97—101.

5. **Колесников А.Л.** Разработка инерционных автоматических гайковертов с динамической опорой. Челябинск, 1981.

6. **А.С. 891418** СССР, МКИ^3. Гайковерт инерционный / А.Л. Колесников и др. (СССР) Опубл. 14.07.82. Бюл. № 19.

СБОРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕЕВ

УДК 621.757.06

А.Г. Холодкова, *канд. техн. наук*
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
E-mail: grigorevamary23@gmail.com

Сборка комбинированных клеевых соединений

Рассмотрены технологические особенности сборки комбинированных клеевых соединений. Отмечены их преимущества и недостатки.

Discussed the technological features combined assembly of adhesive joints. Marked their advantages and disadvantages.

Ключевые слова: сборка, клеевое соединение, адгезия, когезия, тепловой зазор.

Keywords: assembly, glue joint, adhesion, cohesion.

Склеивание — один из способов получения неразъемных соединений деталей по цилиндрическим, плоским поверхностям. Этот процесс обусловлен тем, что между клеем (адгезивом) и склеиваемой поверхностью возникают силы адгезии. Природа адгезии достаточна сложна, она объясняется межмолекулярными и химическими связями между клеем и склеиваемыми поверхностями. Прочность клеевого соединения определяется не только адгезионным взаимодействием, но и прочностью самого клеевого слоя (когезионная прочность).

К преимуществам клеевых соединений относят:

- высокую усталостную прочность;
- возможность соединения разнородных материалов;
- равномерность распределения напряжений в соединении (повышается сопротивление вибрациям);
- высокую прочность на сдвиг;
- уменьшение объема механической обработки (отпадает надобность сверления отверстий для крепежа);
- герметичность и коррозионную стойкость;
- в ряде случаев уменьшение массы и себестоимости изготовления изделия.

Недостатками клеевых соединений являются: низкая прочность на отрыв (отдир, расслаивание); "старение" — меньшая долговечность по сравнению со сварными и клепаными соединениями, незначительная тепловая стойкость ряда клеев.

Эти недостатки удается компенсировать при выполнении комбинированных соединений. Так, устранение зазора в клеевом соединении может быть обеспечено при использовании комбинированного соединения: с натягом и клеем. Сочетание двух методов: с применением термовоздействия — нагрева охватывающей детали и нанесения анаэробного клея на сопрягаемую поверхность охватываемой детали, позволяет устранить недостатки, присущие каждому из этих методов.

Соединения, получаемые комбинированным методом, имеют более высокую прочность: в 2,5—3,0 раза больше, чем у соединений, полученных запрессовкой, и в 1,3—1,5 раза больше, чем у соединений, полученных склеиванием [1]. Прочность таких соединений (силу выпрессовки $P_{\text{вып}}$, Н) рассчитывают по формуле

$$P_{\text{вып}} = \pi dL\left(\tau_s k + pf\right),$$

где d, L — номинальные диаметр и длина соединения, мм;

τ_s — статическая прочность на сдвиг клеевого соединения, Н/мм^2;

k — интегральный поправочный коэффициент, учитывающий особенности конкретного соединения: материал деталей, тип соединения, его геометрию, тепловой зазор, условия работы и т.д.;

Таблица 1

Значения монтажного теплового зазора

Диаметр соединения, мм	Предельное отклонение размера отверстия, мкм, H7	Предельные отклонения размера вала, мкм			Максимальный натяг δ_c, мм			Минимальный монтажный зазор $i_{c_{min}}$	Δd, мм	Монтажный зазор i_c, мм		
		k6	p6	s6	H7/k6	H7/p6	H7/s6			H7/k6	H7/p6	H7/s6
40	+25	+18	+42	+59	+0,018	+0,042	+0,059	0,05	0,079	0,061	0,037	0,02
		+2	+26	+43								
50	+30	+21	+51	+72	+0,021	0,051	+0,072		0,099	0,078	0,048	0,027
		+2	+36	+53								
60	+30	+21	+51	+72	+0,021	+0,051	+0,072		0,119	0,098	0,068	0,047
		+2	+36	+53								
70	+30	+21	+51	+78	+0,021	+0,051	+0,078	0,07	0,139	0,118	0,088	0,061
		+2	+36	+59								
80	+35	+25	+59	+93	+0,025	+0,59	+0,093		0,158	0,133	0,099	0,065
		+3	+37	+71								
90	+35	+25	+59	+93	+0,025	+0,059	+0,093	0,1	0,178	0,153	0,119	0,085
		+3	+37	+71								
100	+35	+25	+59	+101	+0,025	+0,059	+0,101		0,198	0,173	0,139	0,097
		+3	+37	+79								

p — давление на поверхности контакта, МПа;

f — коэффициент сцепления.

Исходя из условий собираемости, тепловой зазор $i_{c\min}$ должен быть не менее $0{,}001d$, что при диаметрах соединения $d \geqslant 40$ мм составляет больше критического зазора и позволяет собирать сопрягаемые детали простыми по конструкции исполнительными механизмами при одном поступательном движении.

С учетом температурной стойкости клея можно определить область применения комбинированного метода для различных диаметров соединения и величин натягов δ_c. Определив значения тепловых деформаций, можно рассчитать тепловой монтажный зазор, величины которого при использовании анаэробного клея L620, имеющего температурную стойкость, равную 200 °С, для сопрягаемых стальных деталей приведены в табл. 1. Область применения данного метода выделена рамкой. Применение данного метода ограничивается также давлением p, зависящим от значения натяга, рассчитываемого по методике, изложенной в разделе [1].

Результаты расчета давления p для соединений диаметром 40...100 мм по посадкам H7/k6, H7/p6 и H7/s6 стальных втулок приведены в табл. 2. Анаэробный клей L620 по данным фирмы "Loctite" в полимеризованном виде воспринимает давление $p_{\max}$ = 18...22 МПа, поэтому область применения этого метода ограничена посадками H7/p6 для диаметров соединения от 50 мм и более (область применения выделена в табл. 2 рамкой).

Хорошо автоматизируются процессы нанесения анаэробных клеев, используемых для стопорения резьбовых соединений (РС). Активное капиллярное действие этих клеев и заполнение стыковых зазоров в соединениях обеспечивают максимальный поверхностный контакт соединяемых деталей. Окончательная полимеризация клея в РС достигается за 3 ч [19], а контактная прочность — за 10 мин. В РС такого типа отпадает необходимость в контргайках и стопорных шайбах, такие соединения обладают высокой стойкостью к вибрациям.

При введении анаэробных материалов в зону сопряжения и после его полимеризации

Таблица 2

Значения контактного давления для соединений различных размеров

Номинальный диаметр соединений d, мм	Наружный диаметр втулки D, мм	Диаметр отверстия $d_{отв}$, мм	Коэффициент		Контактное давление p, МПа		
			$C1$	$C2$	H7/k6	H7/p6	H7/s6
40	70	20	1,367	2,270	24,750	57,750	81,125
50	80	30	1,825	2,582	19,060	46,289	65,350
60	90	40	2,300	2,900	13,462	32,692	46,154
70	100	50	2,783	3,222	9,992	24,266	37,113
80	110	60	3,271	3,546	9,168	21,637	34,106
90	120	70	3,763	3,871	7,277	17,175	27,072
100	130	80	4,256	4,199	5,914	13,958	23,894

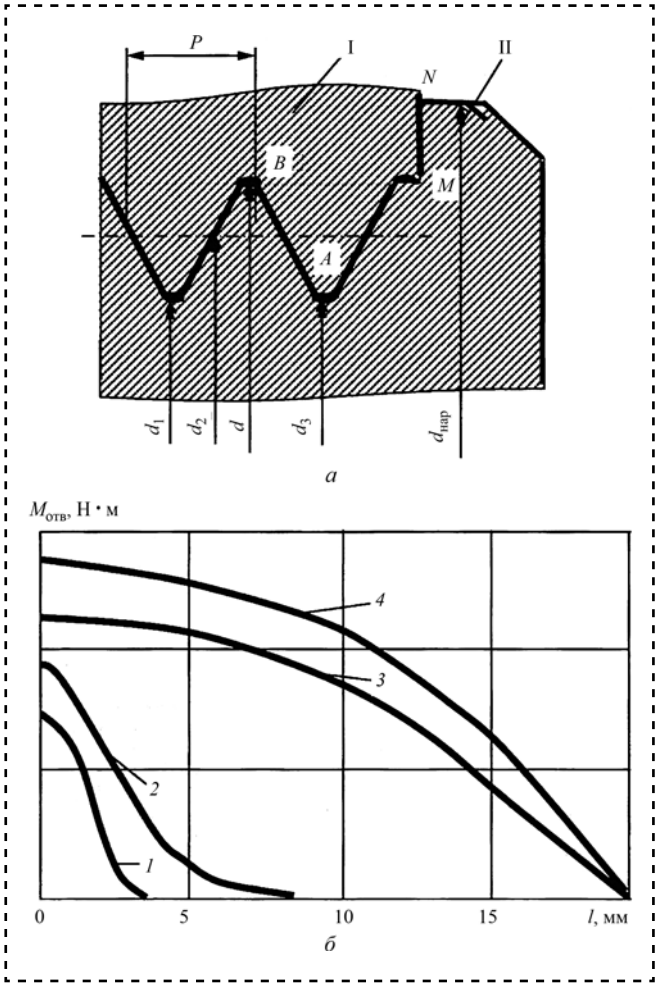


Рис. 1. Резьбовое соединение с анаэробными материалами: *а* — модель контактирования деталей резьбового соединения: I — корпус; II — болт; *б* — зависимость момента отвинчивания от длины свинчивания: *1* — без стопорения; *2* — с пружинной шайбой; *3* — с клеем марки АН-8; *4* — с клеем марки АН-5МД

характер контакта в резьбовом соединении изменяется. При отвинчивании необходимо срезать слой клея, расположенный примерно на 60...80 % площади сопряжения в пустотах (рис. 1, *а*) зоны контакта, возникающих из-за неплотного прилегания рабочих сторон витков резьбы и головки болта, гайки.

Площадь фрикционного взаимодействия РС через анаэробный материал

$$A_{вз}^{ам} = \left[p + 0,265p\left(1 - \eta_{ra}^{1}\right)\right]\pi d_2 n + \frac{\pi\left(1 - \eta_{r,м}^{1}\right)\left(d_{нар}^{2} - d_2^{2}\right)}{4},$$

где p — шаг метрической резьбы;

$\eta_{r,а,м}$ — относительные фактические площади контакта металлических поверхностей на участках AB и MN (см. рис. 1, *а*);

d_2 — средний диаметр резьбы;

n — число витков резьбы, находящихся в контакте;

$d_{нар}$ — наружный диаметр головки болта (гайки) или шайбы.

При выборе марки клея и площади его нанесения необходимо учитывать не только необходимый момент отвинчивания, но и недопустимость среза головки болта при его отвинчивании при ремонте. Увеличение момента отвинчивания с некоторым запасом определяют по формуле

$$\Delta M_{отв} \leqslant 0,2d_3^3\tau_s,$$

Таблица 3

Влияние способа стопорения РС М12 на значение начального момента отвинчивания

Способ стопорения	Начальный момент отвинчивания $M_{отв}$, Н·м		
	Среднее значение		Дисперсия
	абсолютное	относительное	
Без стопорения	87,6	1,00	5,05
С пружинной шайбой	99,9	1,14	5,30
С анаэробными материалами:			
АН-8	128,4	1,47	10,51
АН-5МД	157,5	1,80	8,43

где d_3 — внутренний диаметр резьбы болта или шпильки по дну впадины; τ_s — предел прочности материала болта или шпильки на сдвиг.

Таким образом, необходимый эффект можно обеспечить, выбирая соответствующую марку анаэробного клея или изменяя размер площади его нанесения.

Экспериментальные исследования прочности РС с различными стопорящими элементами проводили на соединениях М12-7Н/8g, полученных с моментом затяжки $M_з = 80$ Н·м [2]. Анализ графиков (см. рис. 1, *б*) и численных результатов экспериментов (табл. 3) показал, что применение анаэробного клея позволило в 1,5—1,8 раза повысить начальный момент отвинчивания по сравнению с соединением без стопорения и в 1,3—1,6 раза — по сравнению с соединением с пружинной шайбой. Другим важным преимуществом РС с клеем является сохранение достаточного момента для их стопорения даже после начального смещения, что существенно повышает их работоспособность.

Анаэробный материал наносят капельно на одну из резьбовых поверхностей на сборочной позиции дозатором, а затем в процессе завинчивания он равномерно распределяется по резьбовому соединению. В последние годы за рубежом анаэробный клей-фиксатор наносят на резьбовую поверхность детали предварительно в виде капсулы в желеобразной оболочке ("икринка"). При завинчивании оболочка повреждается, и клей равномерно распределяется в РС.

При герметизации плоских стыков замена деформируемого или твердого прокладочного материала на анаэробный герметик обеспечивает 100%-ное контактное уплотнение зазоров 0,10...0,25 мм (при использовании активаторов зазор может быть увеличен до 1,2 мм). Соединенные детали могут при малых зазорах касаться друг друга вершинами микронеровностей сопрягаемых поверхностей, а впадины заполняются герметиком. Такие "жидкие" прокладки позволяют разбирать соединения при ремонте и испытаниях узлов при использовании соответствующих марок клеев, например, L64, L518 и других фирмы Loctite. При автоматическом нанесении клея дозатором обеспечивают требуемую толщину прокладки и равномерность слоя в сечении. Рука робота осуществляет траекторию движения установленного в ней дозатора в соответствии с формой стыка собираемых деталей.

Автоматизация технологического процесса нанесения позволила внедрить в производство применение прокладок из клеев-расплавов. Такие клеи ("КПРЛ", "Стек" и др.), нагретые до температуры расплава 100...160 °С, наносят при помощи термопистолетов или специальных приспособлений с системой роликов, легко устанавливаемых в руку робота.

Применяют также комбинированные соединения, как клееклепаные и клеесварные, что существенно уменьшает число сварных точек и заклепок в соединении.

Клееклепаные соединения используют при изготовлении металлоконструкций (рис. 2). Клей создает равномерное поле напряжений в соединенных листах, снижает концентрацию напряжений в местах под заклепки, и позволяет в случае необходимости практически исключить герметизацию заклепочных соединений.

В свою очередь, заклепки воспринимают часть эксплуатационных нагрузок и разгружают клеевой слой в условиях неравномерного отрыва, повышая тем самым общую работоспособность соединения и конструкции в целом.

На прочность клеезаклепочных соединений влияют следующие параметры:

- длина нахлестки l;
- прочность на сдвиг клея τ_s;

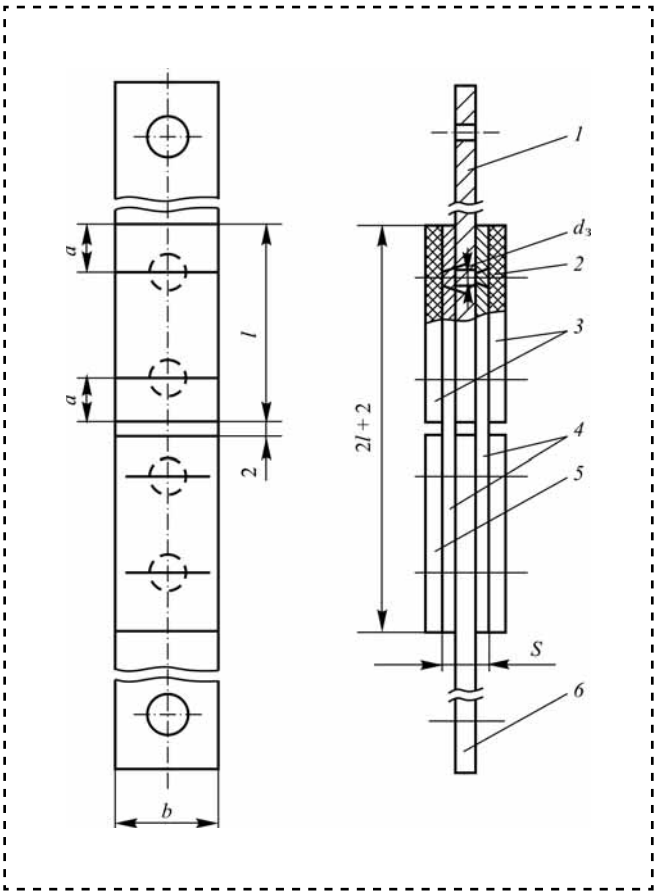


Рис. 2. Клееклепаное соединение:
1, 6 — соединяемые листы; *2* — заклепка; *3* — накладка; *4* — клеевой слой; *5* — защитная пластина

- размер перемычки по первому ряду заклепок *a*;
- толщина клеевого слоя Δ;
- толщина соединяемых элементов *S*;
- напряжения, возникающие в конструкции в результате действия эксплуатационных нагрузок $\sigma_к$.

О влиянии того или иного фактора достаточно объективно можно судить по концентрации напряжений, определяемой коэффициентом (ККН)

$$K = \sigma_1/\sigma_k,$$

где σ_1 — напряжение в исследуемой точке;

σ_k — номинальное напряжение в регулярном сечении конструкции под действием эксплуатационных нагрузок.

Минимальные значения ККН характерны для соединений, где толщина клеевого слоя Δ близка к 0,1 мм.

Для тяжело нагруженных клеезаклепочных соединений [3] необходимо применять клеи с большими значениями $\tau_s \geqslant 70...100$ МПа. К таким клеям относят эпоксидные клеи горячего отверждения, например ВК-27: они обеспечивают наиболее равномерное поле напряжений в листах соединений.

Клепка в период жизнеспособности клеев приводит к увеличению ККН на 10... 15 % вблизи заклепочных отверстий по сравнению с клепкой после полимеризации клея. Это объясняется образованием “голодных зон” склеивания вследствие практически полного выдавливания не отвержденного клея под головками заклепок в процессе их расклепывания, следовательно, расклепывание необходимо вести после полимеризации клея.

Снижение уровня концентрации напряжений в комбинированном соединении позволяет увеличить размер перемычки *a* до $3d_3$, где d_3 — диаметр заклепки, что позволяет разместить заклепку в менее нагруженной зоне (наиболее нагруженной зоной является край нахлестки и прилегающая к нему зона) или вывести из нее полностью при $a = 4d_3$.

Вывод

Использование клеев в сочетании с другими соединениями позволяет повысить их прочность, долговечность и коррозионную стойкость.

Библиографический список

1. **Холодкова А.Г., Кристаль М.Г., Штрихов Б.Л.** Технология автоматической сборки / под ред. А.Г. Холодковой. М.: Машиностроение. 2010. 560 с.

2. **Волчек И.Н.** Применение анаэробных материалов при сборке неподвижных соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 9. С. 33—36.

3. **Матвиенко В.А.** Оптимизация конструкторско-технологических параметров клееклепаных соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 3. С. 20—25.

УДК.621.192

В.М. Труханов, *д-р техн. наук,* **Ю.И. Крыхтин,** *канд. техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: trukhanov1939@mail.ru

Улучшение компоновки и условий эксплуатации четырехвального механизма передач и поворота с предварительным выбором передачи и дифференциальным механизмом поворота для легкой гусеничной машины

Разработан новый четырехвальный механизм передач и поворота с предварительным выбором передачи в коробке перемены передач и дифференциальным механизмом поворота во втором потоке, с улучшенными компоновкой и условиями эксплуатации для легкой гусеничной машины.

Разработанная конструкция существенно улучшает компоновку и условия эксплуатации четырехвального механизма передач и поворота с предварительным выбором передачи и дифференциальным механизмом поворота для легкой гусеничной машины.

New fourshafted gear and slewing mechanism with preliminary choice of transmission in gearbox and differential slewing mechanism in second flow, with improved composition and operation conditions for light tracked vehicle has been developed.

The developed construction improves composition and operation conditions of fourshafted gear and slewing mechanism with preliminary choice of transmission and differential slewing mechanism for light tracked vehicle substantially.

Ключевые слова: механизм передач и поворота, дифференциальный механизм поворота, предварительный выбор передачи, фрикционное устройство, синхронизатор.

Keywords: gear and slewing mechanism, differential slewing mechanism, preliminary choice of transmission, friction device, synchronizer.

Предлагаемое техническое решение предназначено к использованию в транспортном машиностроении при создании быстроходных гусеничных машин (ГМ).

Известна гидромеханическая трансмиссия HS-400 (США), установленная на транспортной машине. В эту трансмиссию входит центральная четырехскоростная коробка перемены передач (КПП) с гидротрансформатором и коническим реверсом на входе.

Коробка перемены передач выполнена с четырьмя валами поперечного расположения в машине. Оси валов закомпонованы между собой в форме ромба, два из которых — дополнительные, имеющие самостоятельные зубчатые приводы с разными передаточными числами от одного связываемого с ведомыми коническими шестернями реверса промежуточного вала и соединенные через зубчатые передачи и индивидуальные элементы управления КПП — фрикционные муфты, с ведомым — выходным, валом КПП.

В трансмиссию входят также расположенные в боковых отсеках картера дифференциальные планетарные механизмы поворота с гидрообъемной передачей (ГОП). Механизмы поворота имеют самостоятельный зубчатый привод от двигателя через ГОП к ведущей конической шестерне механизма трех конических шестерен дифференциальной связи между бортами ГМ. При этом цилиндрические передачи к солнечным шестерням одинаковы и связаны эпициклами с ведомым валом КПП, а водилами через остановочные тормоза и бортовые передачи — с гусеничными движителями.

При прямолинейном движении машины солнечные шестерни в механизме поворота взаимно тормозятся и удерживаются гидропередачей от проворачивания. Передача крутящего момента при прямолинейном движении идет только через КПП. При повороте трансмиссия двухпоточная: потоки мощности от

двигателя идут через эпициклы и через ГОП к солнечным шестерням.

Указанная трансмиссия имеет недостатки — большой габарит по высоте, так как мощная гидростатическая передача с соосными гидронасосом и гидромотором в ней расположены сверху на картере. В указанной трансмиссии имеются гидротрансформатор и гидростатический привод.

Это требует иметь компактные и надежные гидроагрегаты, которые сложны в производстве и эксплуатации. Трансмиссия сложна в конструктивном исполнении и дорога в производстве, имеет большую массу. Расстояние от привалочной плоскости двигателя до оси промежуточного вала значительное, так как на входе в КПП расположен гидротрансформатор.

Целью предлагаемого технического решения является упрощение конструкции, снижение массы, уменьшение габарита по высоте и расстояния от привалочной плоскости двигателя до оси промежуточного вала, удобство компоновки и эксплуатации механизма передач и поворота.

Новизной предлагаемого технического решения является то, что в механизме передач и поворота промежуточный вал соединен жесткой кинематической связью с двигателем и связан через расположенные в боковых отсеках картера фрикционные муфты нечетных и четных передач с зубчатыми приводами к дополнительным валам. Зубчатые приводы через цилиндрические шестерни нечетных и четных передач и индивидуальные зубчатые муфты соединены с ведомым валом. Промежуточный вал через расположенные на нем индивидуальные муфты первого фиксированного радиуса поворота и одинаковые цилиндрические передачи по бортам машины связан с ведомыми шестернями соединительной дифференциальной зубчатой связи между бортами ГМ к солнечным шестерням, выполненной с помощью соединительного вала и цилиндрических шестерен, а через одинаковые цилиндрические передачи с другим передаточным числом и индивидуальные фрикционные муфты второго фиксированного радиуса поворота, расположенные на водилах, — с солнечными шестернями.

Кинематическая схема нового механизма передач и поворота трансмиссии гусеничной машины изображена на рис. 1.

В механизме передач и поворота шестискоростная КПП с трехсекционным картером содержит конический реверс на входе, четыре вала поперечного расположения в машине (оси валов закомпонованы между собой в форме ромба), два из которых — дополнительные *14* и *27*, имеют самостоятельные зубчатые приводы с разными передаточными числами от одного, промежуточного, вала *9* и соединены через установленные на них цилиндрические шестерни *49*, *45* и *6*, *23* нечетных и четных передач соответственно на каждом дополнительном валу, общие для обоих дополнительных валов *14* и *27* ведомые шестерни *46*, *19* передач и индивидуальные элементы управления *12*, *30*, *50*, *31* КПП с ведомым валом *25*.

Промежуточный вал *9* соединен с двигателем жесткой кинематической связью через конический реверс, состоящий из ведущей *2* и двух ведомых конических шестерен *11* и *55*, зубчатой муфты *10* и связан через зубчатые приводы с дополнительным валом. Промежуточный вал *9* связан через фрикционную муфту *52* нечетных передач — Φ_I, Φ_{III}, Φ_V, и цилиндрические шестерни *49*, *45* с дополнительным валом *14* нечетных передач, а через фрикционную муфту *7* — четных передач Φ_{II}, Φ_{IV}, Φ_{VI}, и цилиндрические шестерни *6*, *23* с дополнительным валом *27* четных передач. Дополнительный вал *14* связан с ведомым валом *15* через зубчатые передачи — цилиндрические шестерни *13*, 7, *48*, *19*, *47*, *46*, и индивидуальные элементы управления — зубчатые муфты *12*, *50*. Дополнительный вал *27* связан с ведомым валом *25* через зубчатые передачи — цилиндрические шестерни *36*, *17*, *39*, *19*, *32*, *46* и индивидуальные элементы управления — зубчатые муфты *30*, *31*. Ведущие шестерни передач *13*, *48*, *47*, *36*, *39*, *32* свободно установлены на дополнительных валах *14*, *27* на подшипниках. Ведущие шестерни *49*, *51*, *6*, *5* установлены на промежуточном валу *9*, ведомые шестерни *17*, *19*, *46* связаны жестко с ведомым валом *25*, а шестерни *45* и *26* — с дополнительными валами *14*, *27*.

В боковых отсеках картера *3* трансмиссии находятся дифференциальные планетарные механизмы поворота с соединительной дифференциальной зубчатой связью между бортами ГМ, обеспечивающей одинаковую по величине, но противоположную по направлению

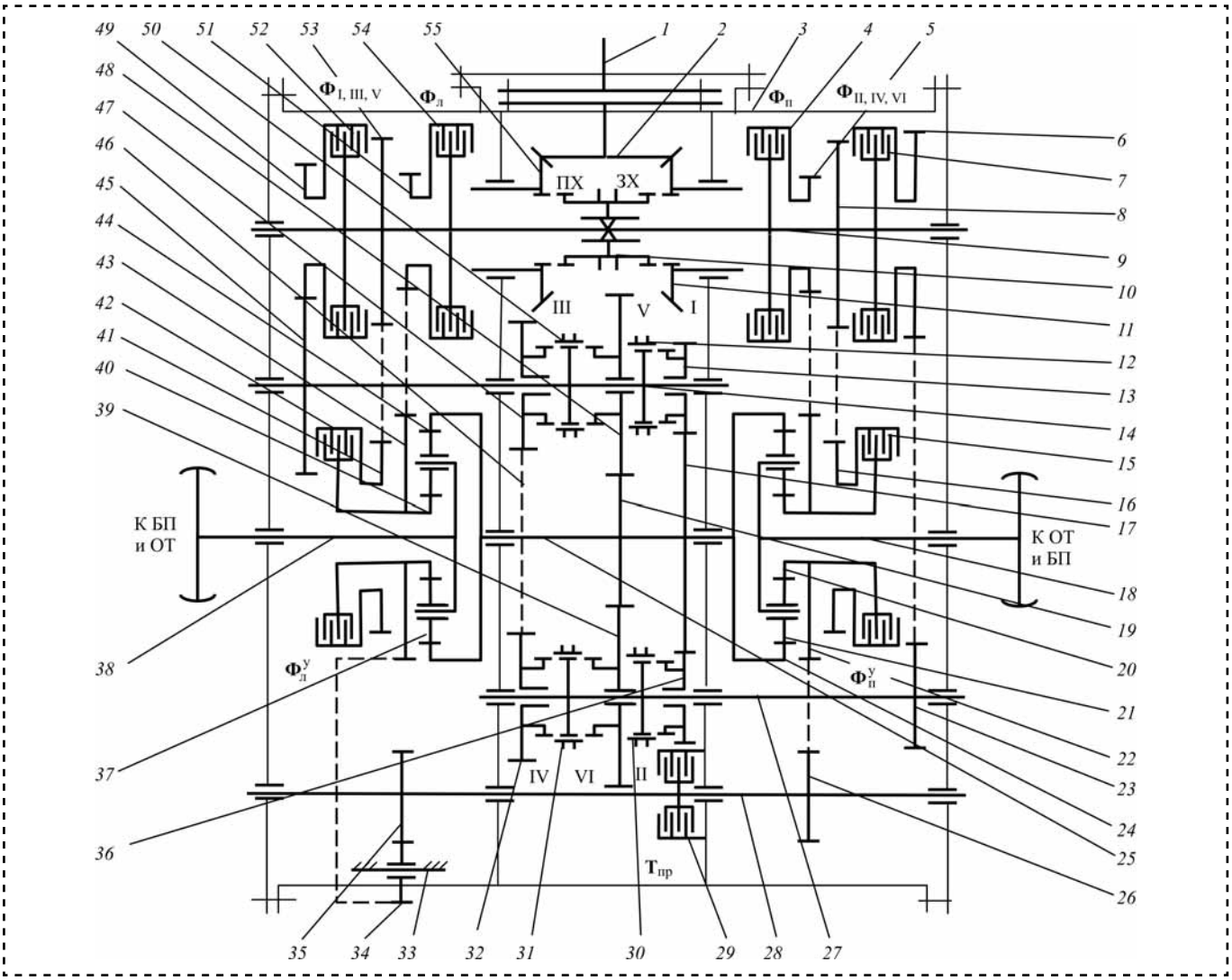


Рис. 1. Кинематическая схема нового механизма передач и поворота трансмиссии гусеничной машины:
1 — двигатель; *2* — ведущая коническая шестерня; *3* — картер; *4* — муфта; 5, *6*, *8*, *11*, *13*, *16*, *17*, *19*, *22*, *23*, *26*, *32*, *34*, *35*, *36*, *39*, *41*, *43*, *45—49*, *51*, *53* — шестерни; *7*, *42*, *52* — фрикционные муфты; *9* — промежуточный вал; *10* — муфта; *12*, *30*, *31* — элементы управления; *14* — дополнительный вал; *15* — ведомый вал; *18*, *38* — водило; *20*, *40* — солнечная шестерня; *21*, *37* — сателлиты; *24*, *44* — эпицикл; *25* — ведомый вал; *27* — дополнительный вал; *28* — соединительный вал; *29* — тормоз; *33* — ось; *50* — зубчатая муфта; *54* — муфта; *55* — ведомая коническая шестерня; ПХ — передний ход; ЗХ — задний ход; I—VI — номера включаемых передач; $\Phi_{I,\,III,\,V}$, $\Phi_{II,\,IV,\,VI}$ — фрикционные муфты для включения передач; $T_{пр}$ — тормоз для прямолинейного движения; $\Phi_л$, $\Phi_п$ — фрикционные муфты для включения первого расчетного радиуса поворота (малого), $\Phi^у_л$, $\Phi^у_п$ — фрикционные муфты для включения второго расчетного радиуса поворота (большого); ОТ — остановочный тормоз; БП — бортовая передача

скорость вращения солнечных шестерен *20* и *40*, соединенных эпициклами *24*, *44* с ведомым валом *25* КПП, а водилами *18* и *38* через остановочные тормоза и бортовые передачи — с гусеничными движителями. Промежуточный вал *9* через расположенные на нем индивидуальные фрикционные муфты *54* и *4* — $\Phi_л$, $\Phi_п$, первого фиксированного радиуса поворота и одинаковые цилиндрические шестерни *51*, *55* по бортам машины связан с ведомыми цилиндрическими шестернями *43* и *22* соединительной дифференциальной зубчатой связи к солнечным шестерням *40* и *20*, выполненной с помощью соединительного вала *28* и цилиндрических шестерен *43*, *35*, *34*, *26*, *22*, а через одинаковые цилиндрические передачи — шестерни *53*, *41* и *8*, *16* с другим передаточным числом и индивидуальные фрикционные муфты *42* и *15* — $\Phi^у_л$ и $\Phi^у_п$ второго фиксированного радиуса поворота, расположенные

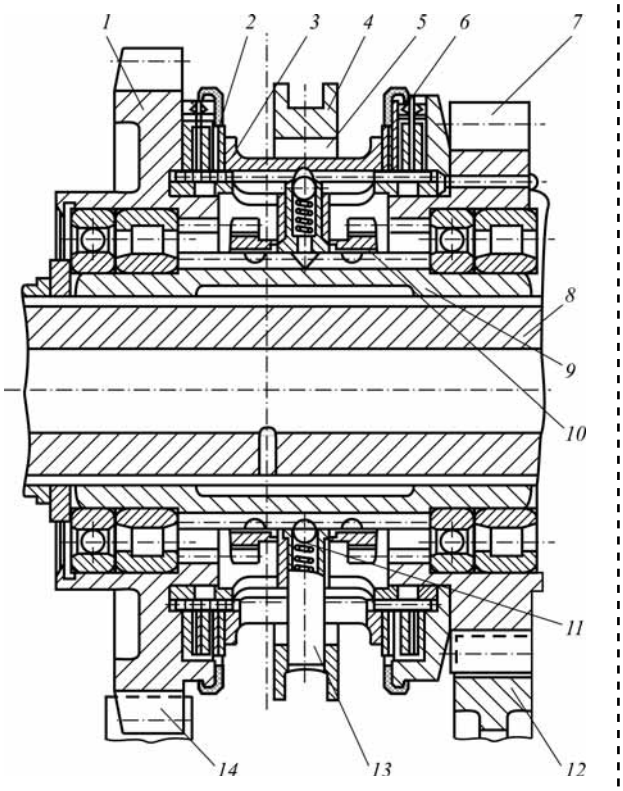


Рис. 2. Дисковый инерционный синхронизатор КП:
1, *7*, *12*, *14* — шестерни; *2* — диск трения; *3* — втулка; *4* — кольцо; *5* — фиксатор; *6* — диск ведомый; *8* — вал; *9* — ступица; *10* — зубчатка; *11* — фиксатор; *13* — палец

на водилах *38* и *8*, связан с солнечными шестернями *40* и *20*. Паразитная шестерня *34* свободно установлена на неподвижной оси *33*.

Для обеспечения устойчивого прямолинейного движения используется дисковый тормоз *29* — $Т_{пр}$.

В предлагаемой трансмиссии механизм поворота дифференциального типа, т.е. при повороте машины сохраняется скорость прямолинейного движения, фрикционные муфты и тормоз *29* выполнены с металлокерамическими дисками или с дисками трения с комбинированной поверхностью [2], работающими по стали в масле. В качестве синхронизаторов для зубчатых муфт *10*, *12*, *30*, *31*, *50* используют конусные или дисковые инерционные синхронизаторы — рис. 2.

Для ГМ массой 17 т и мощностью двигателя 295 кВт (400 л.с.) условия работы дискового синхронизатора для улучшения переключения передач в высокоскоростной КПП с передаточным числом бортовой передачи i = 7,9 при работе со смазкой будут следующими.

Удельная работа трения, кДж/м^2	1380
Максимальная линейная скорость скольжения относительно контртела, м/с	13,6
Максимальное удельное давление на поверхность трения, 10^5 Па	2,92
Температура в зоне трения, °С:	
средняя	100
допустимая	150
Диапазон рабочих температур	−60...+150
Время буксирования, с	0,33...0,37

Конструктивные характеристики дискового синхронизатора таковы:

Механизм включения	Механический с гидроусилителем
Число пар поверхностей трения	5
Материал фрикционный	Сплав алюминиевый Д16АТ
контртела	Сталь 65Г 28...34 HRC
Поверхность трения диска	Радиальные канавки
Параметр шероховатости *Ra* поверхностей трения:	
фрикционного материала	2,5
контртела	2,5
Диаметр трения:	
максимальный	165
минимальный	138
Толщина диска трения, мм	1,5
Тип смазки	МТ-8П ТУ 8.101277—72

Предлагаемая трансмиссия работает следующим образом.

При стоянке машины обе фрикционные муфты *52* и *7* выключены. Для трогания и движения вперед зубчатой муфтой *10* с синхронизатором через положение "передний ход" (ПХ) подключается к промежуточному валу *9* коническая шестерня *55* переднего хода (ПХ), и включается зубчатой муфтой *12* I передача или зубчатой муфтой 30 — II передача и соответствующая муфта (*52* — $Ф_{I, III, V}$ для I передачи или муфта *7* — $Ф_{II, IV, VI}$ для II передачи). При этом поток мощности от двигателя *1* через конические шестерни *2*, *55* передается на промежуточный вал *9* и через включенную фрикционную муфту — на дополнительный вал *14* или *27* соответственно включаемой передаче. С соответствующего подключенного дополнительного вала через включенные шестерни передачи поток мощности передается на ведомый вал *25*.

В планетарных рядах солнечные шестерни *40* и *20* взаимно удерживают друг друга от

проворачивания при прямолинейном движении за счет цилиндрической реверсивной зубчатой связи между ними и тормоза *29*. Основной поток мощности с эпициклов *44* и *24* при остановленных солнечных шестернях *40* и *20* передается через сателлиты *37* и *21* на водила *38* и *18* и далее через остановочные тормоза (ОТ) и бортовые передачи (БП), к ведущим колесам гусеничных движителей машины. Таким образом, при прямолинейном движении машины трансмиссия однопоточная.

При движении машины вперед поворот с малым или большим фиксированным радиусом поворота на каждой передаче осуществляется включением соответствующей фрикционной муфты на левом или правом борту в зависимости от направления поворота: муфты *54* или *4* для получения малого радиуса поворота, муфты *42* или *15* — для получения большого радиуса поворота. Поворот на всех передачах происходит за счет разницы скоростей вращения гусеничных лент, обеспечиваемой одинаковыми по величине, но противоположными по направлению скоростями вращения солнечных шестерен *40* и *20* планетарных рядов дифференциального механизма поворота.

При включении фрикционной муфты поворота на левом или правом борту в зависимости от направления поворота и радиуса поворота дополнительный поток мощности к планетарным рядам механизма поворота передается от двигателя *1* через конические шестерни *2* и *55*, цилиндрические шестерни *43*, *51*; *5*, *22* или *53*, *48*; *8*, *16* — к солнечным шестерням *40* и *20* планетарных рядов.

При повороте влево с малым фиксированным радиусом дополнительный поток мощности передается от промежуточного вала через фрикцион *54* и шестерни *51* и *43* к солнечной шестерне *40* отстающего борта и через цилиндрическую соединительную дифференциальную связь — шестерни *35*, *34*, *26*, *22* — к солнечной шестерне *20* отстающего борта.

При повороте с большим фиксированным радиусом поворота поток мощности передается от промежуточного вала *9* через шестерни *53* и *41*, фрикционную муфту *42* к солнечной шестерне *40* и через шестерни *43*, *35*, *34*, *26*, *22* — к солнечной шестерне *20*. При этом солнечные шестерни *40* и *20* вращаются в противоположных направлениях с одинаковой скоростью. В каждом планетарном ряде механизма поворота основной поток мощности от КПП к эпициклам *14* и *24* суммируется с потоками мощности, поступающими с промежуточного вала *9* к солнечными шестерням *40* и *20* планетарных рядов. При повороте трансмиссия двухпоточная. В трансмиссии на каждой передаче имеется два фиксированных радиуса поворота. Все остальные радиусы поворота получаются за счет пробуксовки фрикционных элементов механизма поворота.

Не снижая скорости при движении на передаче в зависимости от окружающей обстановки механик-водитель может предварительно включить зубчатую муфту последующей передачи: II (при движении на I передаче), III (при движении на II передаче), IV (при движении на III передаче) и т.д. и наоборот.

Так как при движении на любой передаче включена только одна фрикционная муфта *52* или *7*, связывающая свой дополнительный вал *14* или *27* с ведомым валом *25* через шестерни включенной передачи, то предварительное включение зубчатой муфтой последующей передачи, связанной с другим дополнительным валом и отключенной от промежуточного вала *9* через фрикционную муфту, можно производить с небольшим усилием руки через инерционный синхронизатор последующей передачи в течение длительного промежутка времени, имеющегося в распоряжении механика-водителя. Этим можно уменьшить ударные нагрузки в трансмиссии, возникающие при быстрых переключениях передач.

Непосредственное включение последующей передачи осуществляется выключением фрикционной муфты передачи и включением фрикционной муфты последующей передачи. После чего уже при движении на последующей передаче выключается зубчатая муфта отключенной передачи в удобное для механика-водителя время. При этом необходимо при переключениях соблюдать четкое чередование нечетных и четных передач. Предварительное включение зубчатой муфты последующей четной передачи возможно только при движении на нечетной передаче, а последующей нечетной передачи — только при движении на четной передаче, т.е. в КПП производится вклю-

чение только соседней передачи — низшей или высшей.

Трансмиссия имеет полный конический реверс. Для трогания и движения машины назад зубчатой муфтой *10* через положение ЗХ подключается к промежуточному валу *3* коническая шестерня *11* и включается I передача или II передача и соответствующая фрикционная муфта для трогания машины.

Для дифференциальных механизмов поворота расчетный радиус поворота по центру машины определяется по формуле:

$$R_{\text{р}}^{\text{центр}} = B\frac{a_2 + aK}{a_2 - a_1}, \quad (1)$$

где B — колея машины;

a, a_1, a_2 — коэффициенты [3];

K — внутреннее передаточное число суммирующего планетарного ряда.

Коэффициент a определяют как

$$a = \frac{1}{i_{\text{к}} i_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где $i_{\text{к}}$ — передаточное число конической пары КПП;

$i_{\text{ц}}$ — передаточное число цилиндрических пар КП на передачах.

На солнечных шестернях частота вращения составит:

$$\text{отстающий борт: } n_1 = n_{\text{дв}} a_1, \quad (3)$$

$$\text{забегающий борт: } n_2 = n_{\text{дв}} a_2, \quad (4)$$

где $n_{\text{дв}}$ — максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя.

На эпициклических шестернях частота вращения на отстающих и забегающих бортах

$$n_1' = n_2' = n_{\text{дв}} a. \quad (5)$$

Задаемся минимальным расчетным радиусом поворота на высшей передаче — первым и вторым: $R_{\text{р}n}$ и $R'_{\text{р}n}$, где n — номер передачи в КПП, например, $R_{\text{рVI}} = 10B$ и $R'_{\text{рVI}} = 42B$.

Определяем передаточное число дополнительного потока мощности:

$$R_{\text{р}n} = B\frac{a_2 + aK}{a_2 - (-a_2)} = B\frac{a_2 + aK}{2a_2}. \quad (6)$$

Из этого соотношения определяют коэффициенты: a_2, a_2', а соответственно, и a_1 и a_1'.

На высшей передаче: $n_1 = n_2 = n_{\text{дв}} a_2$.

Минимальный расчетный радиус поворота на передачах определяют по формулам:

Первый расчетный радиус поворота

$$R_{\text{рI}} = B\frac{a_2 + a_{\text{I}} K}{a_2 - a_1};$$

$$R_{\text{рII}} = B\frac{a_2 + a_{\text{II}} K}{a_2 - a_1};$$

.....

$$R_{\text{р}n} = B\frac{a_2 + a_n K}{a_2 - a_1}.$$

Второй расчетный радиус поворота:

$$R'_{\text{рI}} = B\frac{a_2' + a_{\text{I}} K}{a_2' - a_1'};$$

$$R'_{\text{рII}} = B\frac{a_2' + a_{\text{II}} K}{a_2' - a_1'};$$

.....

$$R'_{\text{р}n} = B\frac{a_2' + a_n K}{a_2' - a_1'}.$$

Характеристики механизмов передач и поворота для ГМ массой до 18 т представлены в таблице.

Предлагаемый механизм передач и поворота с четырехвальной шестискоростной КПП и дифференциальным механизмом поворота с двумя расчетными радиусами поворота на каждой передаче с фрикционными элементами для быстроходных гусеничных машин массой до 17 т имеет небольшой по высоте габарит, так как на нем нет сверху ГОП, приемлемую массу — до 440 кг без главного фрикциона, хорошо и удобно компонуется в машине за счет трехсекционного картера МПП. Механизм надежен в работе за счет использования современных фрикционных материалов и уменьшения числа деталей в конструкции по сравнению с гидромеханической трансмиссией, так как надежность зависит от числа изнашиваемых фрикционных и зубчатых муфт, зубчатых передач, подшипников качения и скольжения, уплотнений вращающихся валов и подвижных соединений, смазки и ее качества и т.д. В нем уменьшено расстояние от привалочной плоскости двигателя до оси промежуточного вала до 325 мм, так как на входе в КПП после двигателя установлен компактный главный фрикцион, а не гидротрансформатор. Механизм пе-

Характеристики механизмов передач и поворота для ГМ массой до 18 т

Трансмиссия	Масса МПП, кг	Масса, кг			Число сборочных единиц	Число наименований оригинальных деталей	Покупка		Число КПП	Число фрикционных муфт	Число тормозных устройств	Чистота масла
		ГОП	гидротрансформатора	главного фрикциона			ГОП	гидротрансформатора				
Гидромеханическая с двухвальным механизмом передач и поворота с ГОП	630	90	70	—	40	220	1	1	5	5	1 (тормоз-синхронизатор)	Выше, чем в механической трансмиссии
Механическая с новым четырехвальным механизмом передач и поворота с главным фрикционом и дифференциальным механизмом поворота	475	—	—	35	В 1,3...1,4 раза меньше, чем в гидромеханической трансмиссии	В 1,3...1,4 раза меньше, чем в гидромеханической трансмиссии	—	—	6	6	1 (тормоз прямолинейного движения)	—

редач и поворота трансмиссии в предлагаемой конструкции получается узким по ширине — 670 мм без установки ОТ, при шести передачах и двух расчетных радиусах поворота на каждой передаче за счет параллельного распределения потоков мощности на нескольких валах. Картер состоит из трех одинаковых по ширине отсеков, две центральные стенки с опорами картера максимально приближены (до 230 мм), что обеспечивает удобное расположение и надежную работу опор валов и шестерен.

Трансмиссия с новым МПП проще гидромеханической, дешевле для производства, так как исключает применение значительно увеличивающих массу трансмиссии гидроагрегатов, для изготовления которых нужно иметь специализированное производство. В предлагаемой трансмиссии, содержащей механическую КПП с компактными и надежными зубчатыми муфтами с дисковыми инерционными синхронизаторами, процесс непосредственного переключения передач после предварительной подготовительной работы — включение зубчатой муфты последующей передачи при движении на включенной передаче, сводится к попеременному включению и выключению фрикционных муфт — двух главных фрикционов, что осуществляется значительно быстрее и надежнее, чем в известных КПП с одним главных фрикционом и существенно повышает среднюю скорость движения машины и удобство эксплуатации.

При необходимости зубчатые муфты могут быть заменены на фрикционные муфты, коробка передач в трансмиссии может быть автоматизирована.

Вывод

Разработанная конструкция существенно улучшает компоновку и условия эксплуатации четырехвального механизма передач и поворота с предварительным выбором передачи и дифференциальным механизмом поворота для легкой гусеничной машины.

Библиографический список

1. **Труханов В.М., Зубков В.Ф., Крыхтин Ю.И., Желтобрюхов В.Ф.** Трансмиссии гусеничных и колесных машин. М.: Машиностроение, 2001. 736 с.

2. **Труханов В.М., Крыхтин Ю.И.** Разработка фрикционных дисков с комбинированной поверхностью, изготавливаемых с использованием автоматизированной технологии плазменного напыления. Трение и смазка в машинах и механизмах. № 3. 2010. С. 13—18.

3. **Забавников Н.А.** Основы теории транспортных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с.

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

А.М. Кадырметов, *д-р техн. наук,* **А.Ф. Мальцев**
(Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова),
Е.В. Смоленцев, Г.А. Сухочев, *д-ра техн. наук*
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Технологическое обеспечение восстановления изношенных деталей машин плазменным напылением и упрочнением

Рассмотрены целесообразность и возможности использования процессов плазменного напыления и упрочнения покрытий для восстановления деталей машин, представлены результаты испытаний деталей с покрытиями.

The expediency and possibilities of using the plasma-spraying processes and strengthening of coatings for retailoring of machine details. The results of experiment with coated details and presented.

Ключевые слова: восстановление, ремонт, плазменное напыление, плазменное упрочнение, плазмотрон.

Keywords: retailoring, repair, plasma-spraying, plasma coat-strengthening, plasma torch.

Известно, что около 30 % технологического оборудования занято в ремонтных производствах. Потери рабочего времени, затрачиваемого на ремонт сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники, составляют 30...40 %, а количество работающих в сфере ремонта автомобилей в 4...5 раз превышает количество занятых изготовлением автомобилей [1]. Практика деятельности промышленных предприятий и эксплуатации техники показывает, что более 80 % ее отказов обусловлено износом деталей, при этом величина износа составляет всего лишь 0,3...1,0 мм, т. е. доли процента от массы деталей, оставляя нереализованными их высокие остаточную стоимость и ресурс после восстановления изношенного слоя, экономию средств от закупки или изготовления новых запасных частей. В связи с этим во всем мире используют технологии восстановления геометрических размеров и физико-механических свойств поверхностей. Плазменные технологии в целом и плазменное напыление, в частности, относятся к прогрессивным технологиям восстановления и упрочения поверхностей [1].

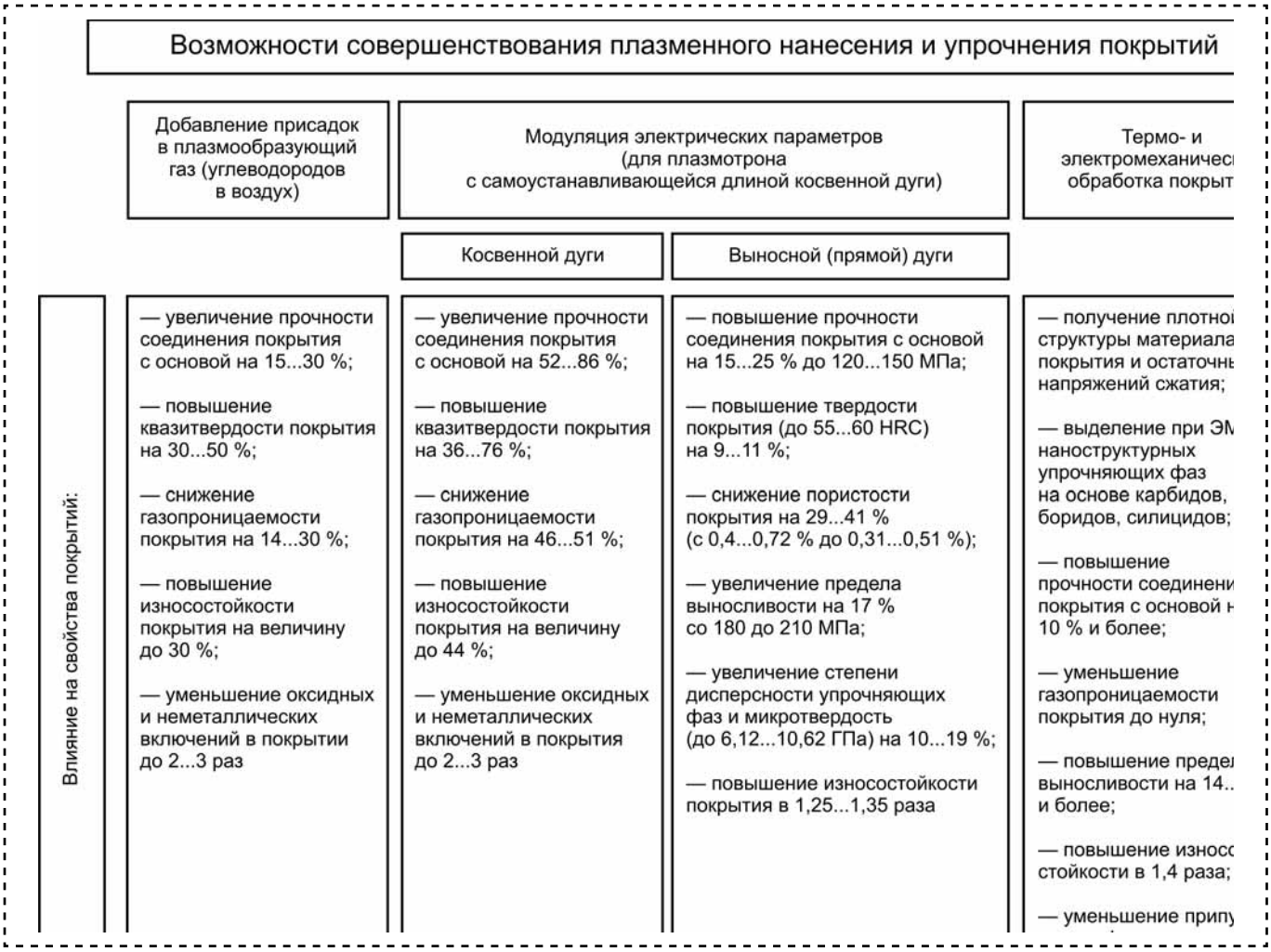
Современное состояние технологий плазменного напыления и наплавки показывает наличие у них недостатков (низкую прочность напыленных покрытий и их соединения с основой, перегрев подложки при плазменной наплавке, ее коробление и высокие остаточные напряжения). Основной проблемой является устранение данных недостатков и обеспечение: при напылении — необходимых прочностных характеристик, минимальных или регулируемых остаточных напряжений и надежности покрытий; при наплавке — минимального термического влияния на основу, исключающего коробление основы и высокие остаточные напряжения в покрытиях и позволяющего их использование при динамических, в том числе ударных, и знакопеременных нагрузках.

Результаты проведенных в данной работе исследований свидетельствуют о возможности эффективного улучшения покрытий, полученных плазменным напылением, с помощью использования методов динамизации параметров и, в частности, с помощью модуляции электрических параметров [2, 3], а также путем комбинированных и совмещенных процессов с вибромеханической, электроискровой обработкой, термо- и электромеханической обработкой и др. (рисунок) [4, 5].

Технологические возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий

В плазменном напылении модуляция электрических параметров является удобным технологическим методом, позволяющим просто регулировать электрические и энергетические характеристики дуг плазмотрона и, тем самым, эффективно управлять качеством покрытий [2, 3]. Модуляция электрических параметров заключается в наложении импульсов тока прямой и обратной полярности на средние токи косвенной и прямой дуг плазмотрона. Это приводит соответственно к импульсному увеличению или снижению мощности дуг.

Для упрочнения плазменно напыленных покрытий из самофлюсующихся материалов традиционно используется их оплавление, однако оно имеет существенные недостатки, заключающиеся в повышенном тепловом воздействии на подложку, ее короблении, пониженном КПД процесса и невозможности использования для тонкостенных



Основные результаты исследований по влиянию модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий на качество покрытий

деталей. Более эффективной является плазменная наплавка по гибридной схеме, включающая в себя одновременное использование косвенной (горящей внутри плазмотрона между его электродами) и прямой (горящей между электродом плазмотрона и деталью) дуг плазмотрона [1].

Регулирование мощности указанных дуг позволяет уменьшить тепловую нагрузку на деталь при высоком качестве наплавки. Однако данный метод требует проведения финишных операций обработки для поверхностей деталей пар трения. Упрочнение напыленных покрытий с помощью термо- и электромеханической обработки позволяет уменьшить припуск на финишные операции шлифования и полирования, залечить микротрещины, сэкономить дорогостоящие материалы покрытия и абразивного инструмента [4].

Электромеханическая обработка сопровождается высокими скоростями нагрева и охлаждения покрытий и в стальной основе приводит к формированию высокопрочной структуры сорбита. К современным известным прогрессивным технологическим методам упрочнения поверхностей и покрытий, позволяющим получить повышенное качество поверхности, также относятся плазменная закалка, модификация, финишное плазменное упрочнение и для поверхностей сложного профиля — комбинированная отделочно-упрочняющая обработка гранулированной токопроводящей средой [5]. В последнем случае комбинированная обработка образцов до и после нанесения покрытия проводится на струйно-динамических установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что во всех вариантах плазменного нанесения и упрочнения покрытий модуляция электрических параметров — удобный и эффективный методы технико-экономического обеспечения высокого качества покрытий. Максимальная эффективность процессов комбинированной обработки при этом осуществляется оптимизацией всего комплекса управляющих факторов применительно к обработке

конкретных деталей и предполагает создание конструкций оборудования и оснастки, обладающих технологическими возможностями регулирования этих факторов.

Возможности использования модуляции электрических параметров в процессах плазменного нанесения и упрочнения покрытий

Эффективность процессов плазменного нанесения обеспечивается за счет модуляции электрических параметров как косвенной дуги плазмотрона, горящей внутри него между его электродами, так и выносной (прямой) дуги, горящей между электродом-соплом плазмотрона и электродом-деталью [2, 3].

Импульсная модуляция мощности косвенной дуги дает возможность генерировать ударные волны в плазменной струе (слабые в условиях проведенного эксперимента), и за счет этого увеличивать коэффициенты лобового сопротивления частиц и их теплообмена с плазменной струей в 2 и более раз, до 30...50 % повышать температуру и скорость плазменной струи и напыляемых частиц [2, 3]. Такое повышение энергетического состояния частиц в момент удара о подложку приводит к улучшению триботехнических и физико-механических характеристик: увеличивается в 1,5...2 раза прочность соединения покрытия с основой; увеличивается твердость покрытия в 1,2...1,7 раза; понижается газопроницаемость покрытия в 4...10 раз; повышается износостойкость покрытия (в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке — в 1,14...1,9 раза) [3].

Для выносной дуги модуляция ее мощности позволяет точечно проплавлять покрытие в местах привязки к основе на глубину до границы с основой и обеспечивать равномерность нагрева основы в масштабах всей ее поверхности [2, 3], минимизируя термические и остаточные напряжения в деталях. Например, при традиционном нанесении плазменного покрытия на зубья ковшей экскаватора неравномерность нагрева в разных местах поверхности зуба достигает 500 °С. Модуляция электрической мощности выносной дуги позволяет снизить до 10...20 °С разброс температур на поверхности. При нагреве цилиндрической детали плазменной струей число оборотов, при котором наступает тепловое насыщение детали, снижается с 8...10 оборотов для случая без модуляции до 2...3 оборотов при ее использовании. При этом неравномерность температур, например шеек коленчатых валов, со второго оборота не превышает 20...30 °С [2]. Дополнительно модуляция электрических параметров выносной дуги позволяет повысить физико-механические и триботехнические характеристики покрытий [2, 3]: повысить микротвердость — в 1,1...1,2 раза, прочность соединения покрытия с основой в 1,15...1,25 раза, сопротивление усталости образцов — до 1,2 раз, износостойкость покрытий — в 1,25...1,35 раза, понизить пористость покрытий в 1,2...1,3 раза.

Для деталей, работающих при повышенных ударных и знакопеременных нагрузках, надежность покрытий может быть повышена за счет термо- и электромеханической обработки, которая обеспечивает сплошность и равномерность структуры покрытия, высокие прочность и твердость, а также улучшение других характеристик [4] (см. рисунок). Дополнительное повышение качества покрытий и снижение количества брака обеспечивается совмещением процессов нанесения и упрочнения покрытий.

Реализация технологического управления качеством плазменных покрытий

Полученные результаты исследований показали возможность эффективного управления качеством плазменных покрытий путем наложения импульсов силы тока на средние значения силы тока косвенной и прямой дуг в режиме модуляции электрических параметров [2—5] либо путем последующей или совмещенной с нанесением термо- или электромеханической обработки покрытия.

В качестве технологических параметров импульсной модуляции тока дуги плазмотрона используются частота модуляции и параметры импульсов — амплитуда, длительность, форма. Частота модуляции достаточно просто регулируется задающим генератором частоты. Амплитуда, длительность и крутизна импульсов регулируется подбором емкостей и активных сопротивлений модуляторов. Исследования позволили разработать технологические рекомендации по выбору режимов операций нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров для различных типов деталей и условий работы их поверхностей [2—4].

Методически выбор режимов нанесения и упрочнения покрытий включает в себя два этапа. На первом этапе находят оптимальные области режимов без модуляции, на втором — выбирают схемы и режимы модуляции.

Для плазменного напыления выбор режимов модуляции косвенной дуги основан на двух принципах. В первом принципе обеспечивается максимизация выделяемой энергии в каждом импульсе при минимально возможной его длительности, т. е. реализуется максимизация амплитуды мощности импульсов. Целью здесь является получение ударных волн с возможно большей интенсивностью при умеренной эрозии электродов и испаряемости

порошка. Для этого случая предпочтительна схема комплексной двухполярной модуляции, когда каждый импульс тока состоит из импульса вычитания и импульса сложения, причем импульс вычитания переходит в импульс сложения.

Во втором принципе обеспечивается интенсификация теплообмена в системе "дуга — плазменная струя — частицы" с помощью создания интенсивных акустических волн в плазменной струе (свыше 150 дБ) на частотах более 5 кГц. Амплитуды импульсов тока здесь могут быть ограничены. В данном случае предпочтительна схема однополярной импульсной модуляции (обратной полярности).

Для выносной дуги поиск режимов модуляции также основывается на двух принципах. В первом случае создаются оптимальные амплитуды и длительности каждого импульса мощности, обеспечивающие локальные участки проплавления покрытия в зоне привязки дуги к основе до границы переходной зоны покрытие—подложка в моменты воздействия импульсов. Во втором случае оптимизируется концентрация количества локальных зон проплавления и обеспечивается равномерность свойств покрытия в масштабе всей поверхности покрытия. Этот принцип реализуется с помощью регулирования частоты модуляции.

Упрочнение покрытий термомеханическим воздействием целесообразно проводить двухступенчатой обработкой [2]: при высоких температурах покрытия (>1400 К) и последующей обработкой при нормальной температуре. Цель первой стадии — выполнение размера образца, обеспечивающего минимальный припуск на шлифование. Усилия обкатки при этом не превышают 250...550 Н/мм. Вторая стадия проводится традиционным способом без нагрева с постепенным увеличением усилия до 400...800 Н/мм. Цель второй стадии — упрочнение покрытия.

Некоторые детали и рабочие органы строительно-дорожных, транспортирующих машин и их конструктивные элементы (шейки валов, гильзы цилиндров, лопатки крыльчаток и колес компрессоров, стенки, опоры и др.) испытывают неодинаковые по уровню эксплуатационные нагрузки в различных рабочих зонах. С целью экономии трудоемкости и материальных ресурсов целесообразно создание закономерного изменения качества рабочих поверхностей, обеспечивающих их равномерный износ.

Использование модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий позволяет решить эту задачу за счет автоматизированного изменения параметров импульсов тока косвенной и/или прямой дуги — амплитуды, длительности и формы импульсов, а также частоты модуляции. При последующей вибромеханической обработке это может быть реализовано программированием движения инструмента, обеспечивающим необходимые типы и законы изменения микрорельефа поверхности. При электромеханической обработке это может быть выполнено путем автоматизированного изменения силы тока. Указанные параметры могут быть использованы и при адаптивном управлении качеством покрытий на заданном уровне независимо от изменения условий и отклонений факторов процесса нанесения и упрочнения плазменных покрытий.

Эксплуатационные и стендовые испытания деталей с плазменными покрытиями, нанесенными на рекомендованных режимах [2], показали, что износостойкость покрытий на шейках коленчатого вала, полученных с модуляцией косвенной и прямой дуги, в 1,2...1,7 раза и более, чем таковая, полученная без использования модуляции дуг. Результаты испытаний покрытий, нанесенных комбинированным способом, показали, что износостойкость покрытий в данном случае максимальна и превышает износостойкость ненапыленных шеек и напыленных по технологиям с модуляцией выносной дуги при одновременной или последующей электромеханической обработке соответственно в 2,2...2,5; 1,2...1,4; 1,1...1,2 раза.

Библиографический список

1. **Тополянский П.А.** Техническая политика в области внедрения процессов восстановления и упрочнения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 11. С. 47—51.

2. **Кадырметов А.М., Станчев Д.И., Сухочев Г.А.** Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 7. С. 29—36.

3. **Сухочев Г.А., Кадырметов А.М.** Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11. С. 53—56.

4. **Кадырметов А.М., Сухочев Г.А. Мальцев А.Ф.** Моделирование качества покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8. С. 39—43.

5. **Технологическое** обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой / Г.А. Сухочев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8. С. 39—44.

РАЗНОЕ

УДК 621.9

Л.Ю. Руднева, *канд. техн. наук (Московский государственный университет приборостроения и информатики)*
E-mail: rudnewal@list.ru

Основные направления технологического прогнозирования

Рассмотрены методы поискового и технологического прогнозирования, указаны пути разработки прогнозов для технологических систем.

Methods of searching and technology prognoses are considered, the directions development of prognoses of technology systems are shown.

Ключевые слова: поисковый прогноз, технологический прогноз.

Keywords: searching prognose, technology prognose.

Прогнозом называется работа по определению вероятных вариантов будущего научно-технического и социально-экономического развития [1—5].

Наиболее широкое распространение получило поисковое и нормативное прогнозирование. *Поисковый* или *исследовательский прогноз* определяет возможные состояния объекта в будущем. Он начинается с имеющихся в данный момент знаний и ориентирован на будущее. *Нормативный прогноз* определяет пути и сроки достижения возможных состояний объекта в будущем и проводится в обратном направлении — к настоящему.

Прогнозирование технологии и организации производства используют при составлении планов и принятии решений без ограничения их вариантов.

При повышении уровня управления технологическими системами (ТС) важная роль отведена научно-техническому прогнозированию, способствующему выбору наиболее прогрессивных научных идей и результатов фундаментальных исследований для последующей их разработки до уровня новых технологических процессов, определению вариантов технической реализации технологии и снижению неопределенности технико-экономических параметров при разработке изделий новой приборной техники.

Кроме того, научно-техническое прогнозирование позволяет путем непрерывного слежения за тенденциями развития науки и техники своевременно вносить конструктивные и технологические изменения в создаваемые и действующие изделия приборной техники, предвидеть трудности в организации и управлении процессами создания, внедрения и широкого использования создаваемых технологий, определить срок своевременной их замены [5].

Наиболее полно разработаны методы прогнозирования организационно-управленческой ситуации в течение жизненного цикла ТС от идеи до внедрения.

Технологические системы можно разделить на функционирующие, разрабатываемые, перспективные.

Для *функционирующих* ТС следует разрабатывать прогнозы по совершенствованию средств автоматизации, механизации [5], организации и управления производством (ОУ). Прогнозная информация такого рода необходима для модернизации оборудования и технического перевооружения производства, а также для организации управления эффективным использованием ТС и своевременной их замены.

Для *разрабатываемых* ТС преимущественное значение имеют автоматизация, механизация (прогноз создания) и ОУ, а для *перспективных* ТС нужен прогноз всех компонентов, но в первую очередь — проектно-технологический прогноз (ПТ).

Прогноз ОУ необходим для всех трех групп ТС, но его характер, значение, объем и направленность существенно меняются для различных групп ТС.

В соответствии с принятой классификацией существующие методы прогнозирования можно отнести к трем группам:

- экстраполяция;
- опрос экспертов (экспертные оценки);
- математическое моделирование.

При **поисковом прогнозировании** на основе существующей ситуации и принятых допущений относительно ее будущего изменения определяют возможные состояния прогнозируемого процесса, события или параметра. При этом обычно используют методы коллективной генерации, идей (мозговая атака), коллективной экспертной оценки (метод Дельфи), линейной экстраполяции (или экстраполяции тенденций), патентный метод прогнозирования.

Метод коллективной генерации идей (мозговая атака) основан на максимальном использовании опыта экспертов и обеспечивает достижение единой точки зрения на основе результатов индивидуального мышления. Метод реализуют с учетом следующих правил:

- запрещена оценка выдвигаемых идей;
- ограничено время одного выступления, но допускаются многократные выступления одного участника;
- обязательное фиксирование всех высказанных идей;
- стимулирование развития новой идеи;
- поощрение свободной дискуссии.

Метод Дельфи — это метод коллективной экспертной оценки, основанный на выявлении согласованного мнения экспертной группы путем автономного и анонимного опроса экспертов в несколько туров с сообщением им результатов предыдущего тура для дополнительного обоснования оценок в последующем туре. В заключение формируется статистический групповой ответ.

При использовании этого метода: тщательно отбирают экспертов, так как результаты во многом зависят от их компетентности; создают условия наиболее продуктивной работы специалистов, в том числе обеспечивают свободный доступ к необходимой информации; проводят предварительную обработку данных и исключают ненужную информацию.

Метод линейной экстраполяции основан на допущении, что существовавшие в прошлом закономерности сохраняются в будущем. Метод позволяет пользоваться статистическим анализом и допускает количественную

проверку результатов. Попытки использования статистических методов прогнозирования в отраслях с высокими темпами нововведений и качественными скачками в развитии техники и технологии (аэрокосмическая, радиоэлектронная), зачастую оказываются неудачными в связи с неправомерностью экстраполяционных допущений.

Несмотря на указанные недостатки, статистические методы находят широкое применение в практике прогнозирования, что объясняется их сравнительной простотой и отсутствием методов, обеспечивающих большую достоверность и точность прогнозов.

Патентный метод прогнозирования основан на оценке публикаций (изобретений, патентов) об объекте прогнозирования по принятой системе критериев, динамики патентования. Практика показывает, что для промышленного использования пригодны не более 10 % принятых изобретений, которые и определяют развитие техники.

При **нормативном прогнозировании** особую значимость приобретает системный подход [4]. На основе определения элементов системы и изучения взаимосвязей между ними определяют пути и сроки достижения возможных состояний прогнозируемого процесса, события или параметра.

Сущность нормативных методов прогнозирования заключается в следующем:

- исходя из конкретных потребностей определяют цель;
- с помощью системного анализа выявляют структуру и формируют проблему;
- проводят полное исследование путей решения проблемы, чтобы не пропустить ни одного решения, обещающего успех.

Среди методов нормативного прогнозирования можно назвать: морфологический анализ, составление сценариев, прогнозирование с помощью экономических моделей, составление "деревьев целей", составление структурных схем последовательности выполнения задач (блок-схем), составление логических схем и математических моделей.

При ***морфологическом анализе*** определяют возможные варианты изучаемого объекта, рассматривают эти варианты с точки зрения осуществимости, предполагаемых затрат и т.п., выбирают оптимальный вариант. Метод отличается глубиной, но сложен в реализации и требует больших материальных затрат.

Метод составления сценариев заключается в составлении и анализе сценариев альтернативных картин будущего.

В ***методе прогнозирования с помощью экономических моделей*** в качестве исходной информации используют объективные сведения о тенденциях развития прогнозируемых объектов и субъективные мнения экспертов о возможных будущих путях и результатах развития прогнозируемой отрасли. Метод, получивший широкое распространение в последние годы, позволяет построить достаточно сложную и логически связанную модель объекта. Прогноз осуществляется в три этапа:

- определение (построение, нахождение) модели объекта;
- экспериментирование с моделью, установление связей между ее элементами;
- перенесение выводов о свойствах и отношениях между элементами модели на объект.

В ***основе метода "дерева целей"*** лежит анализ целей систем или процессов с выделением нескольких структурных или иерархических уровней.

Метод построения структурных схем последовательности выполнения задач состоит в определении и анализе альтернативных путей или последовательности процессов, с помощью которых можно выполнить заданную цель.

Составление логических схем и математических моделей применяют для проектирования технологических процессов и СТО. Для исследовательских прогнозов в настоящее время находят распространение разделы математики, в прошлом считавшиеся "неприкладными" (математическая логика, логические схемы алгоритмов, теория множества и т.п.). В основе моделирования процессов находится эксперимент — реальный или логический, суть которого состоит в непосредственном изучении физических объектов, при этом свойства объекта исследуются не на самом объекте, а с помощью математической модели.

Поисковые и нормативные методы прогнозирования не конкурируют и не заменяют друг друга, они должны применяться совместно. Для комплексного прогноза технологической системы и отдельных ее компонент целесообразно использование методики программного прогнозирования науки и техники. Данная методика позволяет разрабатывать прогнозы для различных групп технологий на разных этапах их жизненного цикла; она ориентирует исследователей в выборе методов, наиболее соответствующих решаемым задачам, и представляет собой рабочий документ исследования реальных технологических систем, разработки прогноза развития группы ТС для совершенствования планирования и организации деятельности предприятий и НИИ.

Основой комплексного прогноза развития промышленного предприятия является прогноз развития технологических систем, который должен содержать:

- прогноз пространственной конфигурации;
- экономический прогноз (прогнозы объема и номенклатуры продукции, производительности труда и себестоимости продукции);
- прогноз социального развития предприятия (прогнозы структуры и численности работников предприятия, в том числе по основным профессиям рабочих и специальностям ИТР, прогноз социальных последствий научно-технического прогресса и т.д.).

Прогнозы техники и технологии способствуют значительному повышению точности и надежности прогнозов технико-экономических показателей промышленных предприятий.

Следует подчеркнуть значение прогноза кадров для новых и реконструированных предприятий в связи с необходимостью своевременной подготовки специалистов для обслуживания новой техники и технологии в условиях современной рыночной экономики.

Библиографический список

1. **Сенкевич В.П.** Прогнозирование как наука // Космонавтика и научно-технический прогресс: труды XIX чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. М.: ИИЕТ АН СССР, 1985.

2. **Рабочая** книга по прогнозированию / И.В. Бестужев-Лада и др. М., 1982.

3. **Венцлавский И.В.** АСУТП, РТК и АТК сборки // Технологии приборостроения. 1982. Вып. 4. С. 37—41.

4. **Венцлавский И.В.** Системный анализ качества технологии сборки командных и исполнительных агрегатов // Технология производства. 1982. Вып. 5. С. 21—27.

5. **Руднева Л.Ю., Венцлавский И.В.** Сборка контактных групп электромеханических программных механизмов по методу групповой взаимозаменяемости на основе принципа равножесткости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 5. С. 33—38.

621.391

М.Н. Сорокин, *д-р техн. наук,* **К.С. Ануфриева**
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
E-mail: sorokin-mn@mail.ru, kristel_anufrieva@mail.ru

Расширение множества центральных композиционных планов

Рассмотрен подход, позволяющий расширить множества центральных композиционных планов. Применение свойств точечного материального тела позволяет обеспечить ортогональное планирование.

The approach allowing to expand sets of the central composite plans is considered. Use of properties of a dot material body allows to provide orthogonal planning.

Ключевые слова: план эксперимента, ортогональное планирование, точечное материальное тело.

Keywords: design of experiment, orthogonal planning, dot material body.

Расширение множества центральных композиционных планов

Обработка результатов эксперимента — важная операция в технологическом процессе проведения экспериментальных исследований. Линейная модель наблюдений является основой для обработки экспериментальных данных [1, 2].

Вектор параметров β для линейной модели наблюдений при выбранном плане эксперимента и функции отклика определяется как решение нормального уравнения [1, 2]

$$\beta = (X^{\mathrm{T}}X)^{-1}X^{\mathrm{T}}y. \qquad (1)$$

Желательно, чтобы при проведении эксперимента план был выбран таким, чтобы планирование было ортогональным, т.е. матрица $X^{\mathrm{T}}X$ была диагональной.

Боксом и Хартли для функции отклика в виде полинома второй степени [1, 2] были построены планы, которые обеспечивали ортогональное планирование. Эти планы были названы центральными композиционными планами или планами Бокса—Хартли.

В данной статье рассмотрен подход и дан метод, позволяющие расширить множество центральных композиционных планов.

Рассмотрим метод, предложенный Боксом и Хартли для построения центрального композиционного плана для полинома второй степени

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2. \qquad (2)$$

Парное взаимодействие x_1x_2 мы исключили, так как оно не оказывает никакого влияния на суть предлагаемого метода. Центральные композиционные планы состоят из точек полного факторного эксперимента 2^k (или его дробных реплик), "звездных" точек и точек, расположенных в начале координат. Для функции отклика (2) в качестве центрального композиционного плана выбираем план D_1 (рис. 1):

$$D_1 = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ +1 & -1 \\ -1 & +1 \\ +1 & +1 \\ -\alpha & 0 \\ +\alpha & 0 \\ 0 & -\alpha \\ 0 & +\alpha \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

Значение α (значение "звездного" плеча) в плане D_1 не определено. В соответствии с линейной моделью наблюдений [1, 2] получим матрицы X, X^{T}, $X^{\mathrm{T}}X$:

$$x = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & +1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & +1 & 1 & 1 \\ 1 & +1 & +1 & 1 & 1 \\ 1 & -\alpha & 0 & \alpha^2 & 0 \\ 1 & +\alpha & 0 & \alpha^2 & 0 \\ 1 & 0 & -\alpha & 0 & \alpha^2 \\ 1 & 0 & +\alpha & 0 & \alpha^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$X^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -\alpha & +\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -\alpha & +\alpha & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \alpha^2 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

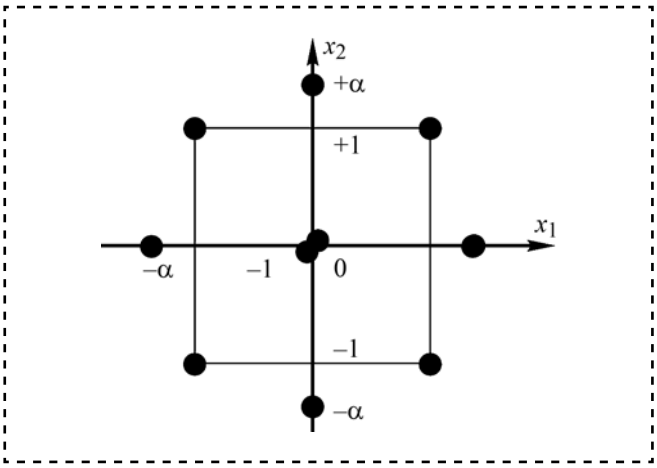


Рис. 1. План Бокса—Хартли

$$X^{\mathrm{T}}X = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 4+2\alpha^2 & 4+2\alpha^2 \\ 0 & 4+2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4+2\alpha^2 & 0 & 0 \\ 4+2\alpha^2 & 0 & 0 & 4+2\alpha^2 & 4 \\ 4+2\alpha^2 & 0 & 0 & 4 & 4+2\alpha^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Планирование не получается ортогональным, так как элементы матрицы (4) a_{14}, a_{15}, a_{41}, a_{51}, a_{45}, a_{54} не равны нулю.

Тогда Боксом и Хартли была проведена замена переменных x_1^2 и x_2^2:

$$\bar{x}_3 = x_1^2 - c; \qquad \bar{x}_4 = x_2^2 - c,$$

где c — постоянное число, требующее определения.

При замене переменных был осуществлен переход от системы координат $0x_1x_2x_1^2x_2^2$ к системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$.

В системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$ функция отклика (2) примет вид:

$$y = \bar{\beta}_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}\bar{x}_3 + \beta_{22}\bar{x}_4,$$

где

$$\bar{\beta}_0 = \beta_0 + \beta_{11}c + \beta_{22}c. \quad (5)$$

В системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$ матрицы X, X^{T}, $X^{\mathrm{T}}X$ в уравнении (1) примут вид:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1-c & 1-c \\ 1 & +1 & -1 & 1-c & 1-c \\ 1 & -1 & +1 & 1-c & 1-c \\ 1 & +1 & +1 & 1-c & 1-c \\ 1 & -\alpha & 0 & \alpha^2-c & -c \\ 1 & +\alpha & 0 & \alpha^2-c & -c \\ 1 & 0 & -\alpha & -c & \alpha^2-c \\ 1 & 0 & +\alpha & -c & \alpha^2-c \\ 1 & 0 & 0 & -c & -c \\ 1 & 0 & 0 & -c & -c \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -\alpha & +\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -\alpha & +\alpha & 0 & 0 \\ 1-c & 1-c & 1-c & 1-c & \alpha^2-c & \alpha^2-c & -c & -c & -c & -c \\ 1-c & 1-c & 1-c & 1-c & -c & -c & \alpha^2-c & \alpha^2-c & -c & -c \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X} = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 4(1-c)^2 + 2\left(\alpha^2 - c\right) - 4c & 4(1-c)^2 + 2\left(\alpha^2 - c\right) - 4c \\ 0 & 4 + 2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 + 2\alpha^2 & 0 & 0 \\ 4(1-c)^2 + 2\left(\alpha^2 - c\right) - 4c & 0 & 0 & 4(1-c)^2 + 2\left(\alpha^2 - c\right)c - 4c^2 & 4(1-c)^2 - 4\left(\alpha^2 - c\right)c + 2c^2 \\ 4(1-c)^2 + 2\left(\alpha^2 - c\right) - 4c & 0 & 0 & 4(1-c)^2 - 4\left(\alpha^2 - c\right)c + 2c^2 & 4(1-c)^2 + 2\left(\alpha^2 - c\right)^2 + 4c^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Чтобы матрица (6) была диагональной, необходимо, чтобы α и c удовлетворяли системе уравнений:

$$\begin{cases} 4(1-c) + 2(\alpha^2 - c) - 4c = 0 \\ 4(1-c)^2 - 4(\alpha^2 - c)c + 2c^2 = 0. \end{cases}$$

Решением этой системы уравнений являются следующие значения α и c:

$$\alpha = \sqrt{\frac{10}{\sqrt{10}} - 2} = 1,0781, \quad c = \frac{2}{\sqrt{10}} = 0,6325.$$

Тогда матрицы $\bar{X}$, $\bar{X}^{\mathrm{T}}$, $\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X}$ для полученных значений α и c примут вид:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0,3675 & 0,3675 \\ 1 & +1 & -1 & 0,3675 & 0,3675 \\ 1 & -1 & +1 & 0,3675 & 0,3675 \\ 1 & +1 & +1 & 0,3675 & 0,3675 \\ 1 & -1,0781 & 0 & 0,5298 & -0,6325 \\ 1 & +1,0781 & 0 & 0,5298 & -0,6325 \\ 1 & 0 & -1,0781 & -0,6325 & 0,5298 \\ 1 & 0 & -1,0781 & -0,6325 & 0,5298 \\ 1 & 0 & 0 & -0,6325 & -0,6325 \\ 1 & 0 & 0 & -0,6325 & -0,6325 \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -1,0781 & +1,0781 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -1,0781 & +1,0781 & 0 & 0 \\ 0,3675 & 0,3675 & 0,3675 & 0,3675 & 0,5298 & 0,5298 & -0,6325 & -0,6325 & -0,6325 & -0,6325 \\ 0,3675 & 0,3675 & 0,3675 & 0,3675 & -0,6325 & -0,6325 & 0,5298 & 0,5298 & -0,6325 & -0,6325 \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X} = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6,3246 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6,3246 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,7012 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,7012 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрица (7) является диагональной. В системе координат $0_1 x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ нормальное уравнение (1) примет вид:

$$\bar{\beta} = (\bar{X}^{\mathrm{T}} \bar{X})^{-1} \bar{X}^{\mathrm{T}} y. \qquad (8)$$

Для решения нормального уравнения (8) необходимо знать вектор наблюдения *y*. Вектор наблюдения *y* для нашего модельного примера может быть сформирован следующим образом. Пусть функция отклика (2) имеет конкретный вид:

$$y = 2 + 0{,}5x_1 + 0{,}5x_2 + x_1^2 + x_2^2. \qquad (9)$$

Тогда компонентами вектора *y* будут значения функции отклика (9) в точках плана (3)

$$y = \begin{pmatrix} 3,\ 4,\ 4,\ 5, \alpha^2 + \alpha - 2, \alpha^2 - \alpha - 2, \\ \alpha^2 + \alpha - 2,\ \alpha^2 - \alpha - 2,\ 2,\ 2 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$

или в числовом выражении при $\alpha = 1{,}7013$

$$y = (3,\ 4,\ 4,\ 5,\ 2{,}6232,\ 3{,}7013,\ 2{,}6232,\ 3{,}7013,\ 2,\ 2)^{\mathrm{T}}.$$

В этом случае вектор $\bar{\beta}$ определяется как решение нормального уравнения (8):

$$\bar{\beta} = (3{,}2649;\ 0{,}5;\ 0{,}5;\ 1{,}1)$$

или в соответствии с (5)

$$\beta = (2;\ 0{,}5;\ 0{,}5;\ 1{,}1). \qquad (10)$$

Подход Бокса—Хартли определяет только один план для произвольного значения *k*. Подход Бокса—Хартли обеспечивает ортогональное планирование за счет выбора параметров α и *c*.

В работе предложен другой подход для обеспечения ортогонального планирования. Суть его заключается в том, что задача построения плана и обеспечения ортогонального планирования может быть представлена как задача конструирования точечного материального тела, т. е. материального тела, состоящего из точек единичной массы [3]. Этим точкам соответствуют точки плана. Координаты материальных точек суть координаты точек плана. Матрица $X^{\mathrm{T}}X$, построенная для точек плана или для точек материального тела, является матрицей моментов инерций. Если

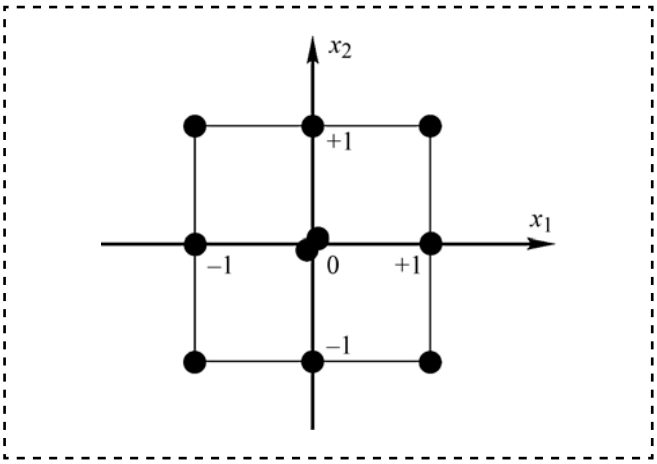


Рис. 2. Расширенный план Бокса—Хартли

для точек материального тела оси координат, в которой определены точки материального тела, являются главными и центральными, то тогда матрица моментов инерций диагональная. Подобная аналогия позволяет определить и метод получения ортогонального планирования. Необходимо для точечного материального тела определить главные центральные оси.

Покажем это, используя для сравнения предыдущий пример. Пусть функция отклика останется прежней (2). План эксперимента D_2 представлен на рис. 2.

$$D_2 = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ +1 & -1 \\ -1 & +1 \\ +1 & +1 \\ -1 & 0 \\ +1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & +1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (11)$$

Мы выбрали "звездное" плечо равным единице, т. е. $\alpha = 1$. Теперь мы не имеет возможности варьировать величиной "звездного" плеча для получения ортогонального планирования. Мы могли выбрать значение α в пределах $0 < \alpha \leqslant \sqrt{2}$, если выбор точек плана ограничен сферой радиуса R, $R = \sqrt{2}$. В соответствии с линейной моделью наблюдений матрицы X, X^{T}, X^{T}X для функции отклика (2) и плана (11) примут вид:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & +1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & +1 & 1 & 1 \\ 1 & +1 & +1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & +1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & +1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$X^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$X^{\mathrm{T}}X = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 6 & 6 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 6 & 4 \\ 6 & 0 & 0 & 4 & 6 \end{pmatrix}. \qquad (12)$$

Матрица (12) не является диагональной. Чтобы матрица (12) стала диагональной, введем новые переменные $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$ (рис. 3):

$$\bar{x}_3 = x_1^2 - c, \qquad \bar{x}_4 = x_2^2 - c,$$

где c — постоянное число, требующее определения.

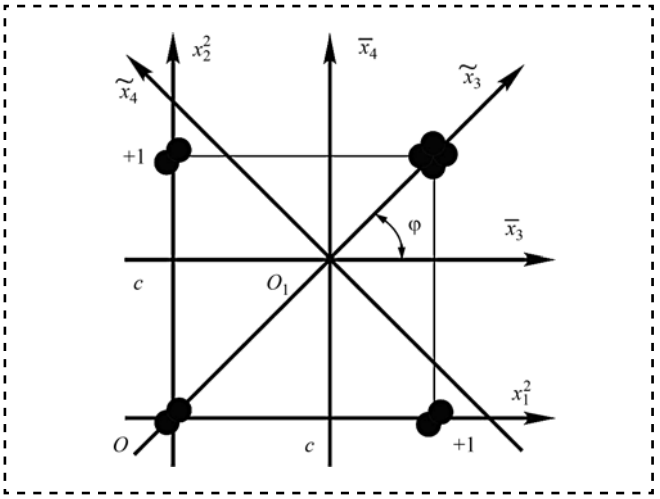


Рис. 3. Изменение осей координат плана для получения ортогонального планирования

При замене переменных осуществлен переход от системы координат $0x_1x_2x_1^2x_2^2$ к системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$..

С точки зрения предлагаемого подхода такая замена переменных переносит систему координат $0x_1x_2x_1^2x_2^2$ в центр масс точечного материального тела. В системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$ функция отклика (2) примет вид:

$$y = \bar{\beta} + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}\bar{x}_3 + \beta_{22}\bar{x}_4,$$

где

$$\bar{\beta}_0 = \beta_0 + \beta_{11}c + \beta_{22}c. \qquad (13)$$

В системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$ матрицы $\bar{X}$, $\bar{X}^{\mathrm{T}}$, $\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X}$ в уравнении (1) примут вид:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1-c & 1-c \\ 1 & +1 & -1 & 1-c & 1-c \\ 1 & -1 & +1 & 1-c & 1-c \\ 1 & +1 & +1 & 1-c & 1-c \\ 1 & -1 & 0 & 1-c & -c \\ 1 & +1 & 0 & 1-c & -c \\ 1 & 0 & -1 & -c & 1-c \\ 1 & 0 & +1 & -c & 1-c \\ 1 & 0 & 0 & -c & -c \\ 1 & 0 & 0 & -c & -c \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 1-c & 1-c & 1-c & 1-c & 1-c & 1-c & -c & -c & -c & -c \\ 1-c & 1-c & 1-c & 1-c & -c & -c & 1-c & -c & -c & -c \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X} = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 6(1-c)-4c & 6(1-c)-4c \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 6(1-c)-4c & 0 & 0 & 4(1-c)^2-4(1-c)c+2c^2 & 4c^2-14c+6 \\ 6(1-c)-4c & 0 & 0 & 4c^2-14c+6^2 & 4(1-c)^2-4(1-c)c+2c^2 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Чтобы матрица (14) была диагональной, прежде всего необходимо, чтобы элементы этой матрицы a_{14}, a_{15}, a_{41}, a_{51} были равны нулю или чтобы выполнялось условие

$$6(1 - c) - 4c = 0, \text{ т.е. } c = 0{,}6.$$

В системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$ матрицы $\bar{X}$, $\bar{X}^{\mathrm{T}}$, $\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X}$ для значения $c = 0{,}6$ примут вид:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0,4 & 0,4 \\ 1 & +1 & -1 & 0,4 & 0,4 \\ 1 & -1 & +1 & 0,4 & 0,4 \\ 1 & +1 & +1 & 0,4 & 0,4 \\ 1 & -1 & 0 & 0,4 & -0,6 \\ 1 & +1 & 0 & 0,4 & -0,6 \\ 1 & 0 & -1 & -0,6 & 0,4 \\ 1 & 0 & +1 & -0,6 & 0,4 \\ 1 & 0 & 0 & -0,6 & -0,6 \\ 1 & 0 & 0 & -0,6 & -0,6 \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & -0,6 & -0,6 & -0,6 & -0,6 \\ 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & -0,6 & -0,6 & 0,4 & 0,4 & -0,6 & -0,6 \end{pmatrix};$$

$$\bar{X}^{\mathrm{T}}\bar{X} = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,4 & 0,4 \\ 0 & 0 & 0 & 0,4 & 2,4 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

В матрице (15) элементы a_{45} и a_{54} не равны нулю. Если эти элементы рассматривать с позиции точечного материального тела, то они определяют центробежный момент этого тела $J_{\bar{x}_3\bar{x}_4}$ относительно осей $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$ в системе координат $0_1x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$. Чтобы элементы a_{45} и a_{54} стали равными нулю, необходимо оси $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$ повернуть к осям $\tilde{x}_3$, $\tilde{x}_4$ на угол φ, при котором $J_{\tilde{x}_3\tilde{x}_4} = 0$. При повороте осей мы перейдем к новой системе координат $0_1x_1x_2\tilde{x}_3\tilde{x}_4$ (см. рис. 3). Переменные $\tilde{x}_3$ и $\tilde{x}_4$ связаны с переменными $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$ соотношением:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_3 \\ \tilde{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}_3 \\ \bar{x}_4 \end{pmatrix}.$$

Угол поворота осей φ, при котором обеспечивается равенство нулю центробежного момента $J_{\tilde{x}_3\tilde{x}_4} = 0$, определится из выражения:

$$\mathrm{tg}2\varphi = \frac{2J_{\bar{x}_3\bar{x}_4}}{J_{\bar{x}_4^2} - J_{\bar{x}_3^2}},$$

где $J_{\bar{x}_4^2}, J_{\bar{x}_3^2}$ — моменты инерции точечного материального тела относительно осей $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$. Для нашего случая $\varphi = \pi/4$.

В системе координат $0_1 x_1 x_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4$ функция отклика (2) примет вид:

$$y = \bar{\beta}_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \tilde{\beta}_{11}\tilde{x}_3 + \tilde{\beta}_{22}\tilde{x}_4,$$

где

$$\begin{pmatrix} \tilde{\beta}_{11} \\ \tilde{\beta}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \end{pmatrix};$$

$$\tilde{\beta} = \left(\bar{\beta}_0, \beta_1, \beta_2, \tilde{\beta}_{11}, \tilde{\beta}_{22}\right).$$

В системе координат $0_1 x_1 x_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4$ нормальное уравнение (1) примет вид:

$$\tilde{\beta} = (\tilde{X}^{\mathrm{T}}\tilde{X})^{-1}\tilde{X}^{\mathrm{T}} y, \qquad (16)$$

а матрицы $\tilde{X}$, $\tilde{X}^{\mathrm{T}}$, $\tilde{X}^{\mathrm{T}}\tilde{X}$, в уравнении будут равны

$$\tilde{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0,4\sqrt{2} & 0 \\ 1 & +1 & -1 & 0,4\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & +1 & 0,4\sqrt{2} & 0 \\ 1 & +1 & +1 & 0,4\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -0,1\sqrt{2} & -0,5\sqrt{2} \\ 1 & +1 & 0 & -0,1\sqrt{2} & -0,5\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 & -0,1\sqrt{2} & 0,5\sqrt{2} \\ 1 & 0 & +1 & -0,1\sqrt{2} & 0,5\sqrt{2} \\ 1 & 0 & 0 & -0,6\sqrt{2} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -0,6\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix};$$

$$\tilde{X}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0,4\sqrt{2} & 0,4\sqrt{2} & 0,4\sqrt{2} & 0,4\sqrt{2} & -0,1\sqrt{2} & -0,1\sqrt{2} & -0,1\sqrt{2} & -0,1\sqrt{2} & -0,6\sqrt{2} & -0,6\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5\sqrt{2} & -0,5\sqrt{2} & 0,5\sqrt{2} & 0,5\sqrt{2} & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\tilde{X}^{\mathrm{T}}\tilde{X} = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}. \qquad (17)$$

В системе координат $0_1 x_1 x_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4$ мы получили ортогональное планирование, матрица (17) стала диагональной. Если в качестве вектора наблюдений y принять вектор

$$y = (3;\ 4;\ 4;\ 5;\ 2,5;\ 3,5;\ 2,5;\ 3,5\ 2,2),$$

то из нормального уравнения (16) получим вектор $\tilde{\beta}$:

$$\tilde{\beta} = \left(2,8;\ 0,5;\ 0,5;\ \sqrt{2};\ 0\right).$$

Вектор наблюдений y сформирован по аналогии с вектором наблюдений для функции отклика (9).

Если из системы координат $0_1 x_1 x_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4$ вернуться к начальной системе координат $0 x_1 x_2 x_1^2 x_2^2$, то значения β_0, β_{11}, β_{22} при $\varphi = \pi/4$ примут вид:

$$\begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$\beta_0 = \bar{\beta}_0 - \beta_{11} c - \beta_{22} c = 2.$$

Таким образом, вектор

$$\beta = (2;\ 0,5;\ 0,5;\ 1,1).$$

Мы получили тот же самый вектор β, что и для центрального композиционного плана (10).

Применение предлагаемого подхода и метода получения главных центральных осей показано на примере расширения множества центральных композиционных планов для $k = 2$. Однако данный подход и метод могут быть применены для расширения множества центральных композиционных планов при $k > 2$.

Выводы

1. *Предложен подход к расширению множества центральных композиционных планов.*

2. *Указанный подход основан на представлении задачи построения планов как задачи конструирования точечного материального тела, состоящего из точек единичной массы и координаты которых равны координатам точек плана.*

3. *Предложен метод, обеспечивающий ортогональное планирование для исходного плана, который основан на построении главных центральных осей для точечного материального тела.*

4. *Предложенный подход продемонстрирован на примере построения плана на базе центрального композиционного плана при $k = 2$, $\alpha = 1$, который обеспечивает ортогональное планирование.*

Библиографический список

1. **Асатурян В.И.** Теория планирования эксперимента. М.: Радио и связь, 1974. 248 с.

2. **Сидняев Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статических данных. М.: Юрайт, 2012. 399 с.

3. **Петкевич В.В.** Теоретическая механика. М.: Наука, 1981.

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, Стромынский пер., д. 4,
Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98, факс: (499) 269-48-97
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 269-54-98, факс 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* *Корректор Сажина Л.И.*
Сдано в набор 01.04.2015. Подписано в печать 18.05.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.